



PERÚ

Ministerio
del Ambiente

Instituto
Geofísico del Perú

Subdirección de
Ciencias de la Tierra
Sólida - SCTS



PROGRAMA PRESUPUESTAL N 068: REDUCCIÓN DE LA VULNERABILIDAD Y ATENCIÓN DE EMERGENCIAS POR DESASTRES

Zonas Geográficas con Gestión de Información Sísmica
Generación de Estudios Territoriales de Peligro Sísmico



ZONIFICACIÓN SÍSMICA – GEOTÉCNICA DEL ÁREA URBANA DE LA CIUDAD DE CERRO AZUL

(Comportamiento Dinámico del Suelo)

Responsable: Hernando Tavera

Lima - Perú

2016

ZONIFICACIÓN SÍSMICA - GEOTÉCNICA DEL ÁREA URBANA DE LA CIUDAD DE CERRO AZUL

Provincia de Cañete - Departamento de Lima
(Comportamiento Dinámico del Suelo)

Responsable del Proyecto: Hernando Tavera

Desarrollo del Proyecto

Unidad de Ingeniería

MsC. Isabel Bernal

Unidad de Geodinámica

MsC. Juan Carlos Gómez

Personal Participante

Wilfredo Sulla

Pilar Vivanco

Kelly Pari

Segundo Ortiz

Liliana Torres

Roberth Carillo

Fabiola Rosado

Mariana Vivanco

Lizbeth Velarde

Christian Chiroque

Luz Arredondo

Héctor Lavado

Javier Oyola

Julio Lara

Henry Salas

John Chahua

Orlando Hanco

Jesús Huarachi

Tsunamis: Julio Martínez

Apoyo Técnico

Estela Torres
Estherfilia Campos
Augusto Cárdenas
Roberth Yupanqui

RESUMEN EJECUTIVO

En el marco del Programa Presupuestal por Resultados N°068: Reducción de la Vulnerabilidad y Atención de Emergencias por Desastres se ejecutó el proyecto “Zonas Geográficas con Gestión de Información Sísmica”, el mismo que tuvo como una de sus actividades la “Generación de Estudios Territoriales de Peligro Sísmico” obteniéndose como resultado final, la Zonificación Sísmica - Geotécnica del área urbana de la ciudad de Cerro Azul, distrito de Cerro Azul, provincia de Cañete, departamento de Lima. El estudio permite conocer el Comportamiento Dinámico del Suelo a partir de la recolección de información y aplicación de métodos sísmicos, geofísicos, geológicos, geomorfológicos y geotécnicos. Asimismo, se propone los posibles escenarios a presentarse ante la ocurrencia de inundación por tsunamis.

Los resultados obtenidos para el área urbana de la ciudad de Cerro Azul han permitido identificar, según la Norma de Construcción Sismorresistente (Norma E.030), la existencia de tres zonas sísmicas-geotécnicas correspondientes a suelos Tipo S1, S3 y S4, este último asociado a condiciones excepcionales

El Mapa de Zonificación Sísmica-Geotécnica para el área urbana de la ciudad de Cerro Azul se constituye como información primaria a ser utilizada por ingenieros civiles y arquitectos en el diseño y construcción de estructuras apropiadas para cada uno de los tipos de suelos identificados en este estudio. Asimismo, este documento técnico debe constituirse como herramienta de gestión de riesgo a ser utilizado por las autoridades locales y regionales.

ÍNDICE

RESÚMEN EJECUTIVO

ÍNDICE

ANEXOS

1.- INTRODUCCIÓN

2.- OBJETIVOS

3.- DISTRITO Y CIUDAD DE CERRO AZUL

3.1.- Clima

4.- ANTECEDENTES

4.1.- Estudios previos

5.- CONDICIONES LOCALES DE SITIO

6.- NORMA E.030, DISEÑO SISMORRESISTENTE

7.- METODOLOGÍA

7.1.- Estudios de sismicidad

7.2.- Estudios de peligro sísmico

7.3.- Estudios de tsunamis

7.4.- Estudios geológicos y geotécnicos

7.5.- Estudios sísmicos y geofísicos

8.- ASPECTOS SISMOLÓGICOS

8.1.- Sismicidad

8.2.- Peligro Sísmico

8.3.- Tsunamis

9.- GEOMORFOLOGÍA, GEOLOGÍA y GEODINÁMICA

9.1.- Geomorfología

9.1.1.- Unidades Geomorfológicas

9.1.1.1.- Origen denudacional

9.1.1.2.- Origen deposicional

9.1.1.3.- Origen marino

9.2.- Geología

9.2.1.- Geología regional

9.2.2.- Geología local

9.3.- Geodinámica

9.3.1.- Movimientos en masa

10.- GEOTÉCNIA

10.1.- Clasificación de suelos SUCS

10.2.- Potencial de licuación de suelos

10.3.- Ensayo de corte directo

10.4.- Capacidad de carga admisible

11.- SÍSMICA Y GEOFÍSICA

11.1.- Estudio sísmico con la técnica H/V

11.2.- Estudios sísmicos con la técnica de arreglos sísmicos

11.3.- Periodos dominantes

11.4.- Estudios de tomografía eléctrica

12.- ZONIFICACIÓN SÍSMICA – GEOTÉCNICA

12.1.- Mapa de Zonificación Sísmica – Geotécnica

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

BIBLIOGRAFÍA

MAPAS

ANEXOS - CD

ANEXO 1: Fichas de calicatas

ANEXO 2: Fichas de ensayo de densidades

ANEXO 3: Fichas de ensayos de DPL

ANEXO 4: Fichas de posteo

ANEXO 5: Fichas de eventos geodinámicos

ANEXO 6: Fichas de granulometría

ANEXO 7: Mapas formato A3

NOTA: La base de datos de campo, la información procesada y material fotográfico puede ser solicitado a la Dirección de Ciencias de la Tierra Sólida del Instituto Geofísico del Perú. Contacto, Dr. H. Tavera (hernando.tavera@igp.gob.pe)

1.- INTRODUCCIÓN

Dentro del Programa Presupuestal por Resultados N°068 “**Reducción de la Vulnerabilidad y Atención de Emergencias por Desastres**”, el Instituto Geofísico del Perú ejecutó durante el año 2015 el Proyecto “**Zonas Geográficas con Gestión de Información Sísmica**” y como parte del mismo, las Unidades de Ingeniería Sísmica, Geodinámica Superficial y Sismología de la Sub-Dirección de Ciencias de la Tierra Sólida desarrollan la Actividad “**Generación de Estudios Territoriales de Peligro Sísmico**” a fin de obtener el Mapa de Zonificación Sísmica – Geotécnica (Comportamiento Dinámico del Suelo) para las áreas urbanas de las siguientes ciudades:

- **Asia**, distrito de Asia, provincia de Cañete, departamento de Lima.
- **San Vicente de Cañete**, capital de la provincia de Cañete, departamento de Lima.
- **Casma**, capital de la provincia de Casma, departamento de Ancash.
- **Cerro Azul**, distrito de Cerro Azul, provincia de Cañete, departamento de Lima.
- **Chancay**, distrito de Chancay, provincia de Huaral, departamento de Lima.
- **Huaral**, capital de la provincia de Huaral, departamento de Lima.
- **Lunahuana**, distrito de Lunahuana, provincia de Cañete, departamento de Lima.
- **Mala**, distrito de Mala, provincia de Cañete, departamento de Lima.

De acuerdo a la historia sísmica del Perú, la región centro ha sido afectada en varias oportunidades por eventos sísmicos de variada magnitud que han generado altos niveles de intensidad, puesta en evidencia con los daños observados post-sismo en cada ciudad y/o área urbana de la región (Silgado, 1978; Tavera et al. 2016). Al ser los sismos cíclicos, es de esperarse que en el futuro, las mismas ciudades y/o áreas urbanas sean afectadas por nuevos eventos sísmicos con la misma o mayor intensidad. Entonces, no es tan importante el tamaño del sismo, sino la intensidad del sacudimiento del suelo, la educación de la población y la calidad de las construcciones.

Los estudios de Zonificación Sísmica – Geotécnica (Comportamiento Dinámico del Suelo) permitirán tener mayor conocimiento sobre las características dinámicas del suelo sobre el cual se levantan las ciudades y/o futuras áreas de expansión. Para ello se realiza la aplicación de diferentes metodologías que consideran información sísmica, tsunamis, geofísica, geológica, geodinámica, geomorfológica y geotécnica. Los resultados que se obtienen permiten comprender que no hay suelo malo y que solamente se debe considerar el diseño y la construcción de viviendas y estructuras adecuadas para cada tipo de suelo. Dentro de este contexto, la población de las ciudades y/o áreas urbanas antes indicadas deben comprender que existen tres (3) reglas para construir una casa sismorresistente (www.acerosarequipa.com):

a.) **Buenos Planos.** Los planos de construcción deben ser hechos por profesionales con pleno conocimiento de las características dinámicas del suelo descritas en los Mapas de Zonificación Sísmica – Geotécnica.

b.) **Buenos Profesionales.** Para la construcción de las viviendas y/o obras de ingeniería se debe contar siempre con la supervisión de ingenieros civiles, arquitectos, etc.

c.) **Buenos materiales.** Solo la calidad de los materiales que se utilizan en la construcción permitirá tener la seguridad de que las estructuras fueron correctamente construidas.

Finalmente, remarcar que el Mapa de Zonificación Sísmica – Geotécnica permite conocer las características dinámicas del suelo y se constituye como información primaria a ser utilizada por los ingenieros civiles y arquitectos en el diseño y construcción de las estructuras apropiadas para cada tipo de suelo identificado en la zona de estudio. Asimismo, debe considerarse como herramienta de gestión de riesgo a ser utilizado por las autoridades locales y regionales.

2.- OBJETIVOS

El objetivo principal a cumplir en este estudio es obtener el Mapa de Zonificación Sísmica – Geotécnica (Comportamiento Dinámico del Suelo) para el área urbana de la ciudad de Cerro Azul, provincia de Cañete, departamento de Lima (Figura 1). Asimismo, es de interés que las autoridades locales y regionales dispongan de un documento técnico que les ayude en el desarrollo y ejecución de proyectos orientados a la gestión del riesgo de desastres ante la ocurrencia de sismos, lo cual conlleva a mejorar la calidad de vida de sus pobladores, así como proyectar hacia el futuro una adecuada expansión urbana.



Figura 1: Vista Panorámica de la Plaza de Armas de la ciudad de Cerro Azul

3.- DISTRITO Y CIUDAD DE CERRO AZUL

La historia de Cerro Azul se remota a muchos años y se relaciona con el valle del huarco; lugar donde existió una cultura preincaica que vivía de la pesca y la agricultura. Luego ante la amenaza de ser conquistados por los Incas, se agrupó con los reinos vecinos, conformando así la Confederación del Huarco. Al final el pueblo fue sometido por el inca Pachacutec quien mandó a construir una Fortaleza de piedra (Fortaleza de Cerro Azul), con escalinatas hacia el mar en honor a su victoria y como símbolo a su poder omnímodo.

Durante muchos años, la ciudad marítima del Huarco tuvo prestancia urbana y presencia política, sobre todo por la presencia de la Fortaleza de Cerro Azul. De renombre a Cerro Azul históricamente en 1615, cuando la bahía fue escenario de una de las tantas acciones que los españoles en el Perú libraron contra los piratas. Asimismo, en esta época los españoles realizaron una de sus tantas barbaries, la devastación de la fortaleza de Cerro Azul en 1640 y 1746, llegando a importar las piedras de dicha fortaleza para construir el muelle.

Posteriormente, en 1830 se expide un decreto para habilitar el Puerto de Cerro Azul para el comercio de cabotaje; es decir para permitir la salida al mar de los productos del valle de Cañete, llegando a ser tan importante para el país que en 1870 se construye un pequeño muelle de madera y un ferrocarril, prevaleciendo la empresa British Sugar Company. Cerro Azul permaneció por muchos años anexado a la jurisdicción geopolítica de San Vicente y de San Luis, hasta que un 3 de Julio de 1921, en la Sala de Sesiones del Congreso Regional del Centro de Huánuco, los parlamentarios acuerdan elevar al Distrito al antiguo pueblo de pescadores; y el 16 de Agosto del mismo año se expide impresa la ley N° 464, en la ciudad de Lima (Gobierno de Augusto B. Leguía).

Según Kroeber, el nombre de Cerro Azul, tanto del puerto como de la población, se deriva de los cerros; cuando en ciertas estaciones del año tienen un tinte definitivamente azulado, sobre todo cuando se les ve a distancia. El distrito de Cerro Azul ocupa un área de 105,17 km² (Figura 2) y imita por el norte con el distrito de Asia, por el sur con el distrito de San Luis, al este con el distrito de Quilmana y por el oeste

con el Océano Pacífico. Cerro Azul está conformado por los sectores de Bellavista, Colina Blanca, Parihuanco, Puente Tabla y el Centro Urbano.

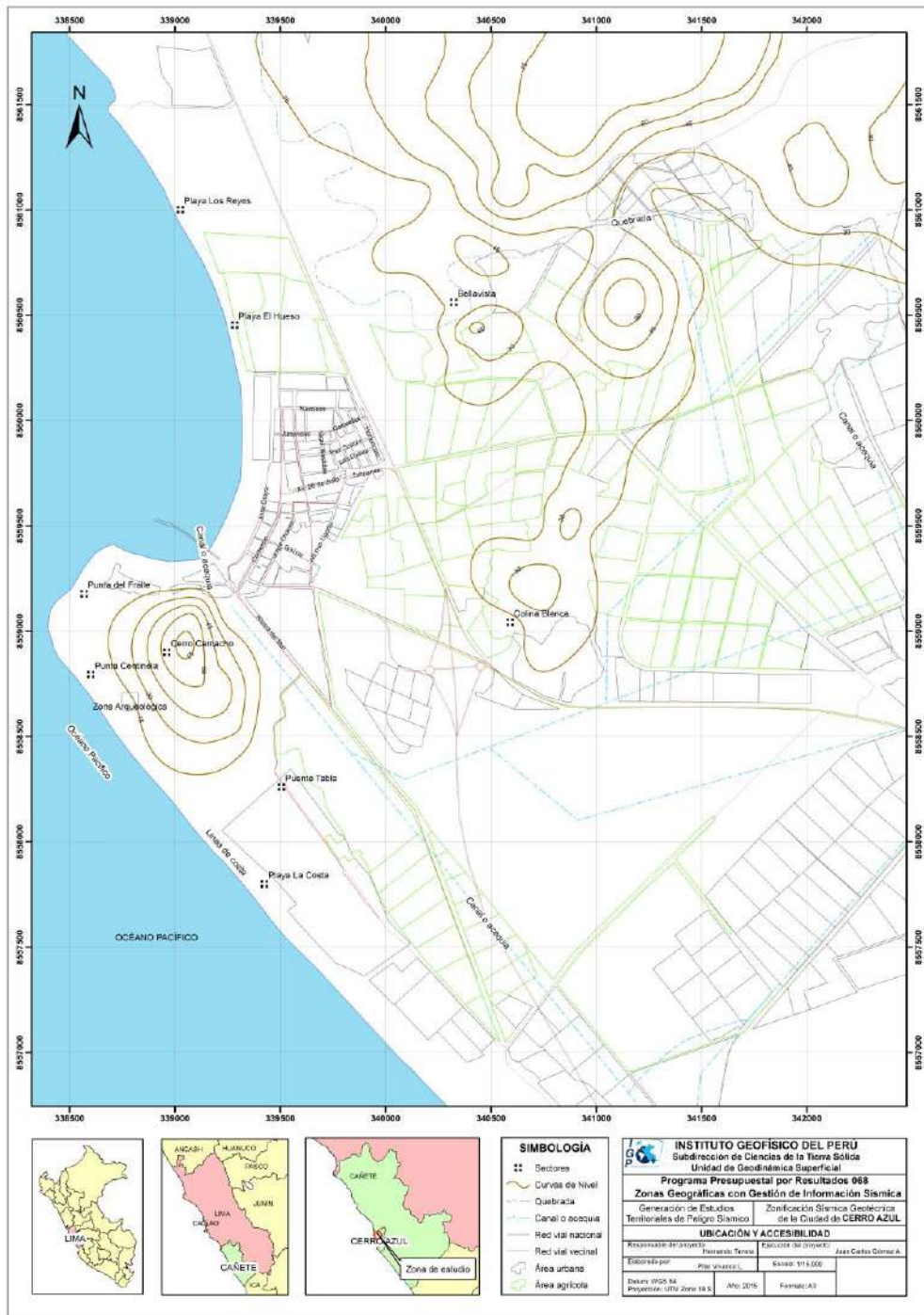


Figura 2: Ubicación geográfica del área urbana de la ciudad de Cerro Azul y alrededores

3.1.- Clima

El distrito y ciudad de Cerro Azul presenta clima subtropical-árido con temperaturas promedio anual que varían entre los 21°C a 24°C. Esta información corresponde al informe realizado por INDECI (2002), puesto que actualmente en la zona y en los alrededores, no existe una estación meteorológica operativa.

4.- ANTECEDENTES

La historia sísmica del Perú ha mostrado que su borde occidental presenta un alto índice de ocurrencia de eventos sísmicos y de acuerdo a su magnitud, muchos de ellos han producido daños importantes en ciudades y localidades distribuidas cerca de la zona costera. La ocurrencia de efectos secundarios como asentamientos, licuación de suelos, derrumbes, caídas de roca y tsunamis propiciaron el incremento de pérdidas humanas y materiales en el área epicentral (Silgado, 1978; Dorbath et al, 1990; Tavera y Buforn, 2001).

El alto riesgo en la zona costera de Perú, se ha incrementado desde los años 80 debido a que muchas de las ciudades y/o localidades han soportado procesos continuos de migración de población proveniente del interior del país y ante la falta de una adecuada planificación urbana y de acertadas políticas de planeamiento, los inmigrantes han ocupado zonas de riesgo ante la ocurrencia de peligros como los sismos, tsunamis y otros efectos secundarios. A estos escenarios, se suma el hecho de que las viviendas fueron construidas de manera inadecuada, sin seguir criterios de ordenamiento territorial y mucho menos, respetando la Norma E.030 de Diseño Sismorresistente. Es común ver en algunas ciudades, como las viviendas se asientan en laderas de cerros, ríos, cauces de quebradas secas y zonas de terrazas inundables sin medir su vulnerabilidad, pero si, incrementando el riesgo en dichas zonas.

Considerando que uno de los causantes directos de los daños que producen los sismos en las ciudades, es la calidad de los suelos sobre el cual se encuentran las viviendas y otras obras de ingeniería, en el año 2005, la Asociación Peruana de Empresas de Seguros (APESEG) y el Centro de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres (CISMID) realizaron un importante aporte para la mejora en la Gestión del Riesgo en Lima Metropolitana con el estudio de Vulnerabilidad y Riesgo Sísmico realizado en 42 Distritos de Lima y Callao (Microzonificación Sísmica), el mismo que se constituyó como información primaria y de base para cualquier otra investigación orientada a la gestión de riesgos en el Perú (Figura 3). Como parte de este esfuerzo, el Instituto Geofísico del Perú, realiza estudios similares en los Distritos de Pucusana, Santa María, San Bartolo, Punta Negra, Punta Hermosa, Santa Rosa y El Agustino, permitiendo completar la información para el total de los distritos que conforman el área de la ciudad de Lima Metropolitana.

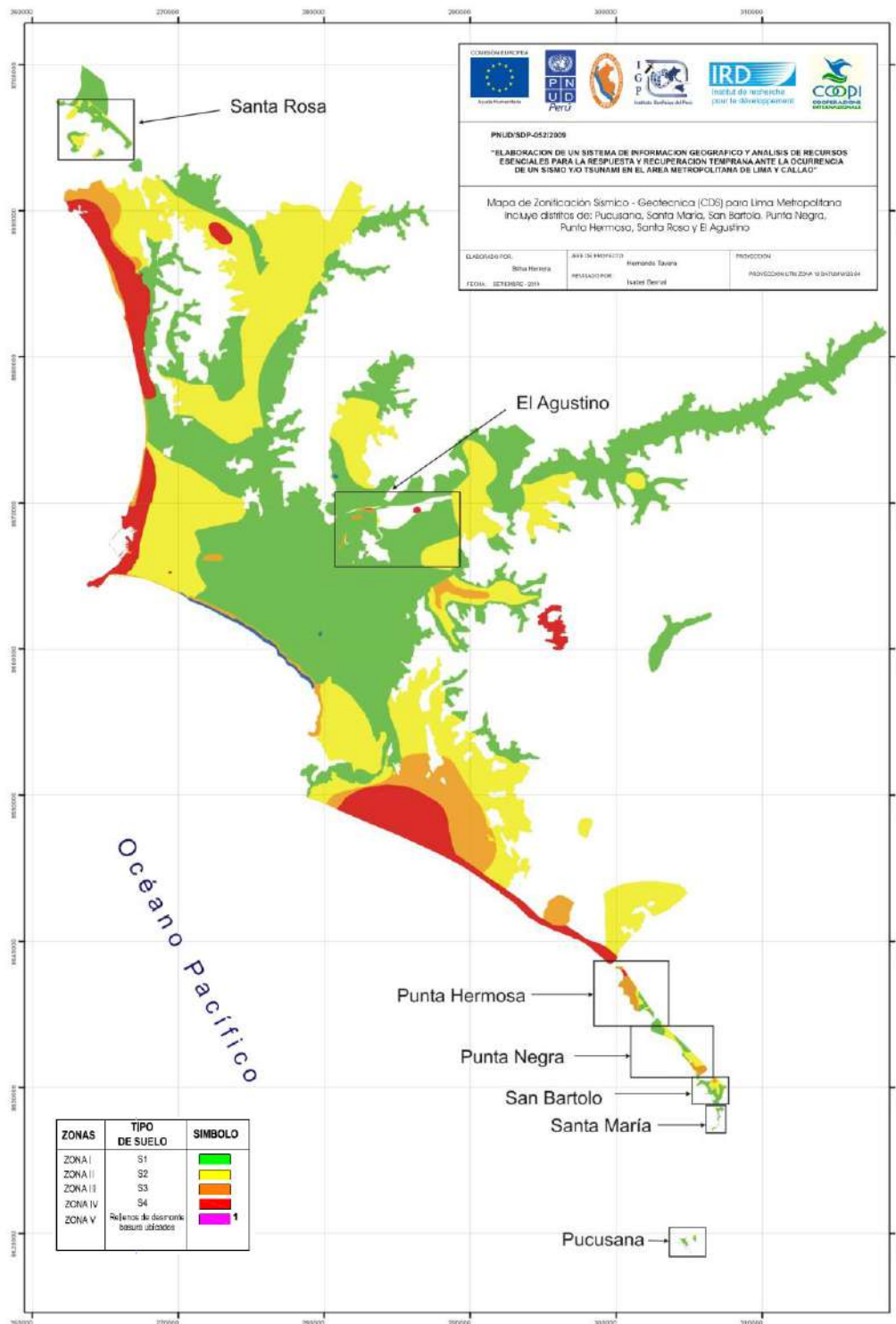


Figura 3: Mapa de Zonificación de suelos para Lima Metropolitana elaborado por el CISMID (APESEG, 2005) y complementado por el IGP (distritos en recuadro) dentro del proyecto PNUD (PNUD, 2010)

A partir del año 2012 y como parte del Programa Presupuestal por Resultados N°068 “Reducción de la Vulnerabilidad y Atención de Emergencias por Desastres”, el Instituto Geofísico del Perú (IGP) continúa con la realización de los estudios de Zonificación Sísmica-Geotécnica en las áreas urbanas de Chosica, Chaclacayo, Huaycán y Carapongo, todos ubicados en el departamento de Lima. En el año 2013, los estudios son realizados en las ciudades de Chimbote y Huarmey del departamento de Ancash; además de Barranca y Huacho del departamento de Lima. En el año 2014, estudios similares son realizados en las ciudades de Acarí, Bella Unión, Yauca, Chala, Camaná, Arequipa, Punta de Bombón y Cocachacra, todas ubicadas en el departamento de Arequipa.

Durante el año 2015, el IGP realiza los estudios de Zonificación Sísmica-Geotécnica en las ciudades de Asia, San Vicente de Cañete, Cerro Azul, Chancay, Huaral, Lunahuana y Mala en el departamento de Lima; además, de la ciudad de Casma en el departamento de Ancash. Los resultados obtenidos para el área urbana de la Ciudad de Cerro Azul son presentados en este informe bajo el siguiente título: **“Zonificación Sísmica – Geotécnica del área urbana de la Ciudad de Cerro Azul”**.

4.1.- Estudios previos

Para el distrito y ciudad de Cerro Azul, se ha recopilado información sobre estudios previos de geología, geotécnica, sísmica y geofísica realizados por diversos investigadores e instituciones a fin de ser considerada para proyectar los objetivos del presente estudio, además de complementar los resultados a obtenerse. Entre los principales documentos técnicos consultados, se tiene:

Tavera, H. (2014) - Escenario de sismo y tsunami en el borde occidental de la región central del Perú. El autor cita la existencia de una zona de acumulación de energía sísmica en la región central de Perú y cuyas características serían similares al terremoto de 1746. Asimismo, se indica que dicho generaría niveles de sacudimiento del suelo con aceleraciones entre 500 y 900 cm/s². El sismo podría alcanzar una magnitud de 8.5 Mw, el mismo que sería acompañado de un tsunami con olas de altura del orden de 8 metros.

INDECI-PNUD-PER/02/051- Ciudades sostenibles, (noviembre, 2002) - Plan de Usos del Suelo y Propuesta de Medidas de Mitigación de los efectos producidos por los Desastres Naturales de Las ciudades de la provincia de Cañete. El informe indica que la constitución física de los suelos en la provincia de Cañete permitió identificar zonas de Peligro Medio Alto y Peligro Medio, frente a los sismos. Asimismo, se indica que la ciudad de Cerro Azul esta propensa a peligros como los sismos y tsunamis.

Por otro lado, se hace mención que la ciudad de Cerro Azul, como los demás distritos de la provincia de Cañete que se encuentran en el litoral, se ubica en una zona de alto riesgo sísmico. Por ejemplo, uno de los sismos con efectos destructivos ocurrió en los años de 1940, con una magnitud de 8.0 Ms e intensidad de VIII en la Escala de Mercalli, genero daño y destrucción en la ciudad de Cerro Azul, además el tsunami que afecto a la zona zosterica de la provincia de Cañete, dejo muchas viviendas destruidas, pérdida de vidas humanas y materiales que afectaron a la economía de la zona.

Finalmente, se indica que los suelos sobre los cuales se asienta el área urbana del distrito de Cerro Azul, presentan nivel freático alto, a una profundidad de 1.20 m, aunque a 1.50 m se encuentran gravas de alta resistencia. No se indica la ubicación de las zonas con este nivel freático.

5.- CONDICIONES LOCALES DE SITIO

En la actualidad, es ampliamente conocido que las condiciones locales de sitio, son uno de los principales factores responsables de los daños que se producen en cualquier tipo de edificación durante la ocurrencia de sismos severos. Este factor es fuertemente dependiente de las características geológicas, geomorfológicas, geodinámicas, geotécnicas, sísmicas y geofísicas de los suelos. En conjunto, estos factores controlan la amplificación de las ondas sísmicas causantes de los daños a observarse en la superficie después de ocurrido un evento sísmico.

Las condiciones locales de sitio son evaluadas en los estudios de Zonificación Sísmica-Geotécnica y el resultado es considerado como una de las herramientas disponibles más importantes para minimizar los daños producidos por los sismos. La finalidad es evaluar el comportamiento dinámico de los suelos (CDS) teniendo en cuenta que la intensidad de las sacudidas sísmicas varía considerablemente a distancias cortas y áreas pequeñas. Diversos estudios muestran, que los suelos ante la incidencia de ondas sísmicas asociadas a movimientos débiles y/o fuertes, responden de acuerdo a sus condiciones locales, pudiendo estos modificar el contenido frecuencial de las ondas y/o generar amplificaciones de las ondas sísmicas (Hartzell, 1992; Beresnev et al., 1995; Bard 1995; Lermo y Chávez-García, 1993, 1994 a,b; Bard y Sesame, 2001; Bernal, 2002).

Las metodologías a seguir para lograr el mayor conocimiento sobre el comportamiento dinámico del suelo o efectos de sitio en regiones de moderada a alta sismicidad, consideran los estudios geológicos, geomorfológicos, geodinámicos, geotécnicos, sísmicos y geofísicos (Figura 4a). Cada uno de estos campos de investigación, proveen de información básica sobre las observaciones de campo y la toma de datos in situ, para lo cual es necesario disponer de mapas catastrales actualizados de las zonas en estudio, así como los correspondientes a las zonas de futura expansión urbana.

En conclusión, los efectos que produce cada tipo de suelo sobre la propagación y amplitud de las ondas sísmicas, permiten tipificar los suelos y estimar su comportamiento dinámico. El resultado final es el Mapa de Zonificación Sísmica-Geotécnica que debe constituirse como el documento más importante en las tareas y

programas de gestión del riesgo ante la ocurrencia de sismos. Estudios complementarios que deben realizarse son aquellos que considera la evaluación de elementos expuestos; es decir, conocer el tipo, la calidad y edad de las construcciones; además, de la capacidad de respuesta de los tomadores de decisiones, así como de la misma población. Para estos últimos actores, es importante su participación y compromiso con los simulacros que a nivel nacional realiza INDECI, ellos deben ser replicados en las familias, colegios, universidades y empresas, cualquiera sea su razón social (Figura 4b).

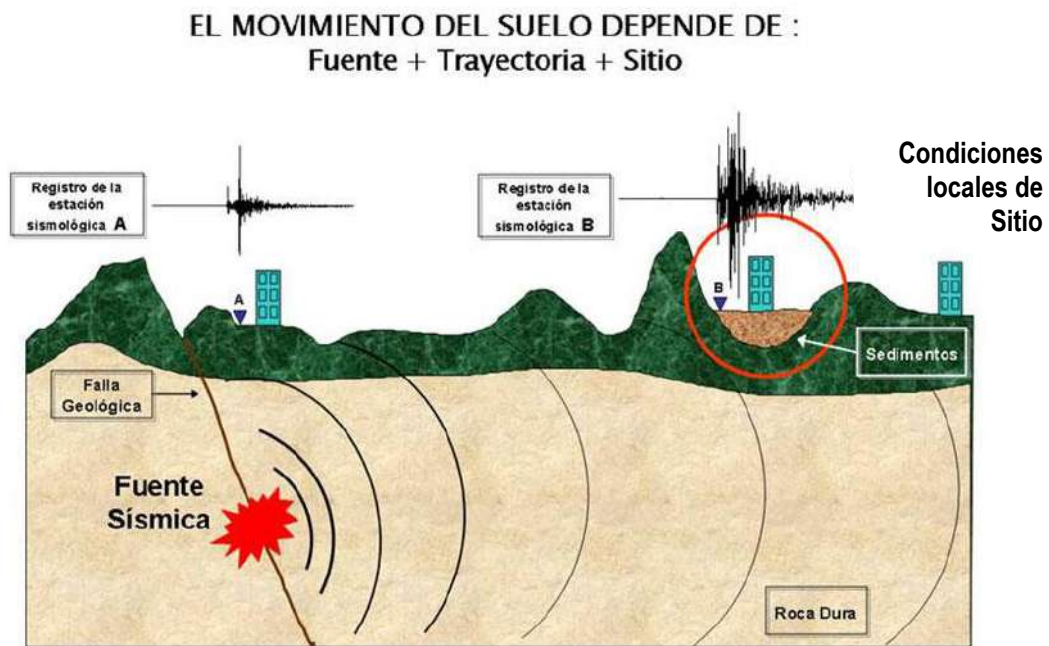


Figura 4a: Las condiciones locales de sitio controlan la amplificación del sacudimiento del suelo, puesto en evidencia con la amplitud del registro sísmico obtenido sobre roca y sedimentos.



Figura 4b: Simulacro de sismo y tsunami en los cuales participa la población de Cerro Azul.

6.- NORMA E.030, DISEÑO SISMORRESISTENTE

En el Perú, la construcción de obras civiles de cualquier envergadura debe considerar las indicaciones contenidas en el Reglamento Nacional de Construcción o "Norma E.030, Diseño Sismorresistente (2016)". Básicamente, esta norma considera la clasificación de los suelos en función de sus propiedades mecánicas, espesor de estrato, período fundamental de vibración y velocidad de propagación de las ondas de corte. La Norma E.030, establece que los suelos pueden ser clasificados en cuatro tipos:

***.-Suelos duros (Tipo S1).** Corresponden a suelos en los cuales la velocidad de propagación de la onda de corte varía entre 500 y 1500 m/s.*

***.-Suelos intermedios (Tipo S2).** Suelos con características intermedias entre las indicadas para los suelos S1 y S3.*

***.-Suelos flexibles o con estratos de gran espesor (Tipo S3).** Corresponden a suelos que presentan velocidades de ondas de corte menor e igual a 180m/s.*

***.-Condiciones excepcionales (Tipo S4).** A este tipo corresponden los suelos excepcionalmente flexibles y los sitios donde las condiciones geológicas y/o topográficas son particularmente desfavorables.*

En general, para cualquier estudio se deberá considerar el tipo de suelo que mejor describa las condiciones locales de cada zona de interés. Para este estudio, la Zonificación Sísmica – Geotécnica se realiza en función de las características mecánicas y dinámicas de los suelos que conforman el terreno de cimentación del área de estudio y de las consideraciones dadas por Norma E.030 (Diseño Sismorresistente). En tal sentido, se establece la existencia de 5 zonas cuyas características son:

***ZONA I:** Zona conformada por estratos de grava coluvial-eluvial que se encuentran a nivel superficial o cubiertos por un estrato de material fino de poco espesor. Este suelo tiene comportamiento rígido con periodos de vibración natural determinados por las mediciones de microtrepidaciones (registros de vibración ambiental) que varían entre 0.1 y 0.3 s. Corresponden a*

suelos Tipo S1 de la norma sismorresistente peruana. En la zona la velocidad de las ondas de corte (V_s) varía entre 500 y 1500m/s.

ZONA II: En la zona se incluye las áreas de terreno conformado por estratos superficiales de suelos granulares finos y suelos arcillosos con espesores que varían entre 3.0 y 10.0 m., subyaciendo a estos estratos se tiene grava eluvial o grava coluvial. Los periodos predominantes del terreno, determinados por las mediciones de microtrepidaciones, varían entre 0.3 y 0.5 s, correspondiendo a suelos Tipo S2 de la norma sismorresistente peruana. En la zona la velocidad de las ondas de corte (V_s) varía entre 180 y 500m/s.

ZONA III: Zona conformada, en su mayor parte, por depósitos de suelos finos y arenas de gran espesor que se encuentra en estado suelto. Los periodos predominantes encontrados en estos suelos varían entre 0.5 y 0.7 s, por lo que su comportamiento dinámico ha sido tipificado como suelo Tipo S3 de la norma sismorresistente peruana. En la zona la velocidad de las ondas de corte (V_s) son menores a 180m/s.

ZONA IV: Zona conformada por depósitos de arena eólicas de gran espesor, depósitos fluviales, depósitos marinos y suelos pantanosos. Los periodos predominantes para estos suelos son mayores que 0.7 s; por lo que, su comportamiento dinámico ha sido tipificado como suelo Tipo S4 de la norma sismorresistente peruana (Según la Norma E.030, es un caso especial y/o condiciones excepcionales).

ZONA V: Zona constituida por áreas puntuales conformadas por depósitos de rellenos sueltos correspondientes a desmontes heterogéneos que han sido colocados en depresiones naturales o excavaciones realizadas en el pasado con espesores entre 5 y 15 m. En esta zona se incluye también a los rellenos sanitarios que en el pasado se encontraban fuera del área urbana y que, en la actualidad, han sido urbanizados. El comportamiento dinámico de estos rellenos es incierto por lo que requieren de estudios específicos.

Esta zonificación condiciona el tipo de estructura que se debe construir; es decir, tipo de material, geometría y el número de pisos en las viviendas o de grandes obras de ingeniería. Se debe buscar que el periodo fundamental de respuesta de la

estructura no coincida con la del suelo a fin de evitar el fenómeno de resonancia y/o una doble amplificación sísmica.

El periodo fundamental de las estructuras puede ser deducido de la fórmula propuesta por Rodríguez y Aristizabal (1998), donde $T = N/\lambda$ (T, Periodo de la estructura; N=Número de niveles en la edificación y λ = Parámetro que depende de la rigidez del sistema estructural). Por ejemplo, según la Norma E-030 (2003), en el Perú el valor de λ es igual a 10 y el periodo dominante para una determinada estructura puede ser estimada con solo conocer el número de pisos de cada vivienda. Conocida la tipificación de suelos, son los ingenieros quienes deben proceder a estimar los valores indicados a fin de reducir la vulnerabilidad de las estructuras.

7.- METODOLOGÍA

El estudio de Zonificación Sísmica – Geotécnica para el área urbana de la ciudad de Cerro Azul y alrededores se ha realizado con información recolectada en campo y con la aplicación de las metodologías que a continuación se describen:

7.1.- Estudios de sismicidad

Para conocer las características de la sismicidad en la región en donde se encuentra la ciudad de Cerro Azul, se hace uso del catálogo y Mapa Sísmico del Perú (Tavera, 2014). Se describe las características de la sismicidad y de los sismos de mayor magnitud e intensidad ocurridos en la región a fin de comprender el porqué de los daños producidos por estos eventos durante el periodo histórico e instrumental. Para la sismicidad histórica se analiza la información contenida en Silgado (1978) y Dorbath et al, (1990), y la instrumental, a partir de la proporcionada en los reportes técnicos elaborados por la Unidad de Sismología de la Subdirección de Ciencias de la Tierra Sólida del Instituto Geofísico del Perú (IGP).

7.2 Estudios de peligro sísmico

Este tipo de estudios considera, en términos de probabilidad, conocer la severidad sísmica o aceleración con la cual podría ser sacudida el área de estudio en un determinado periodo de tiempo, por ejemplo en 500 años de exposición. Para tal objetivo, se hace uso del catálogo sísmico y fuentes sismogénicas definidas por el Instituto Geofísico del Perú (Tavera et al, 2012), las ecuaciones de atenuación propuestas por Young et al (1997) y Sadigh et al (1997), y el algoritmo CRISIS-2007 (Ordaz et al, 2007). Los resultados permiten obtener mapas de iso-aceleraciones probabilísticas, siendo de importancia para proyectar el diseño de cualquier obra de ingeniería que pueda estar, en el futuro, expuesta a una demanda sísmica.

7.3.- Estudios de tsunamis

Considerando que el distrito y ciudad de Cerro Azul cuenta con áreas de playa, es necesario caracterizar el peligro relacionado con la presencia de un tsunami debido a la ocurrencia de un sismo de magnitud 8.5 Mw (Figura 5). Conocido el modelo de

fuentes sísmicas y obtenidas las cartas de batimetría y topografía con alta resolución, el modelado numérico del tsunami se realiza con el algoritmo TUNAMI-N2 desarrollado por investigadores de la Universidad Tohoku de Japón (Goto y Ogawa, 1992). Los resultados obtenidos permiten conocer las zonas de inundación, el tiempo de llegada y la altura de la primera ola de tsunami, información que permitirá orientar las medidas de gestión del riesgo en la zona de estudio.



Figura 5: Vista panorámica de las zonas de playas de Cerro azul consideradas en el modelado de tsunamis

7.4.- Estudios geológicos y geotécnicos

Estos estudios consideran la recolección, en campo, de información geológica, geomorfológica, geodinámica y de zonas susceptibles a deslizamientos y/o flujos. El objetivo es identificar y conocer las características geológicas de los suelos en las áreas de interés y alrededores.

.- **Levantamiento geológico y geomorfológico.** Considera el desarrollo de trabajos de campo orientados a recopilar información sobre las características geológicas y geomorfológicas de carácter local, considerando bases de datos topográficos, de

pendientes, drenajes, litología, uso de suelos y de áreas susceptibles a deslizamientos y/o flujos.

.- **Análisis geodinámico:** Considera la evaluación de los diversos procesos de intemperismo y meteorización que conducen a movimientos en masa, así como el inventario de los mismos teniendo en cuenta parámetros intrínsecos como la litología, pendientes, geomorfología, cobertura vegetal y drenaje. Asimismo, se realiza el análisis de los niveles de inundación por situaciones de crecida de ríos en épocas de lluvias intensas.

.- **Análisis geotécnico:** La geotecnia se encarga del estudio de las propiedades físicas y del comportamiento de los suelos y rocas, y para ello se aplican técnicas de exploración como la elaboración de calicatas, perforaciones, ensayos de mecánica de rocas, etc. Estos estudios se realizan con la finalidad de conocer los parámetros geotécnicos que ayudan al diseño de cimentaciones para estructuras tales como viviendas, edificios, puentes, carreteras, taludes, presas, etc. También permite identificar y solucionar problemas de asentamientos de suelos, licuación, expansividad y agresividad, entre otros.

En este estudio, la recolección de datos para los estudios geotécnicos se realiza mediante calicatas, ensayos de densidad de campo, muestreos con posteadora y ensayos de penetración ligera (DPL). Las características de estos métodos son:

.- **Exploraciones a cielo abierto (Norma ASTM D420):** Conocidas como calicatas y consiste en realizar excavaciones de profundidad superficial (hasta 3 metros) con ayuda de una retroexcavadora. En general las dimensiones son de 1.5 m x 1.5 m de lado x 3.0 m. El objetivo es extraer muestras de suelo para realizar análisis dos tipos de análisis, el primero considera se realiza los análisis granulométricos, límites de elasticidad y contenido de humedad para conocer la clasificación de los suelos de acuerdo al Código SUCS. La segunda muestra se utiliza para el análisis de corte directo; es decir, realizar la aplicación de cargas diferenciadas hasta que la muestra falle, lo cual permite determinar la capacidad portante del suelo (capacidad admisible última). Si la muestra de suelo es grava sin contenido de arena y no es posible aplicar el ensayo de corte directo, se aplica el de densidad máxima y en ambos casos, se estima el valor de capacidad portante (Figura 6).



Figura 6: Calicata elaborada en el sector Bellavista, a 1 km el Este del centro urbano de Cerro Azul.

- Densidad de suelo in situ (Norma ASTM D1556): Consiste en evaluar la relación entre la masa de los suelos (sólidos y líquidos) y el volumen total de un suelo. Para tal objetivo se realiza el ensayo de densidad de campo con el uso del método del cono, el cual permite conocer la densidad y el contenido de humedad del suelo en condiciones naturales. Su aplicación permite conocer la compactación de las partículas que conforman el suelo, más compactos indica mayor resistencia a la deformación (Figura 7).

- Exploraciones con posteadora manual (Norma ASTM D1452): Se define como posteadora a un barrenador manual en forma de “T” que permite realizar sondeos exploratorios (perforaciones) en suelos blandos (arcillas y arenas) hasta una profundidad de 6 metros, procedimiento que permite obtener muestras de suelo. Aunque estas muestras son trituradas, sirven para conocer el tipo de suelo y el contenido de humedad. La técnica no es útil en suelos compuestos por gravas y gravillas.

- Ensayo de penetración dinámica ligera – DPL (Norma DIN4094): Consiste en un equipo de campo y registro continuo sobre el número de golpes necesarios para hacer penetrar un tramo de varillaje a lo largo de todo el ensayo. Permite estimar la resistencia del material (suelo) al hincado del cono dinámico. En este caso, la exploración solo es aplicable en terrenos arenosos, arcillosos y limo – arcillosos (Figura 8).



Figura 7: Ensayo de densidad del suelo a través del método del cono de arena



Figura 8: Equipos, accesorios y técnica de DPL

.- **Ensayo de corte directo** (Norma ASTM D3080): Permite determinar la resistencia al esfuerzo de corte de una muestra de suelo, sometida a fatigas y/o deformaciones que se simula a la que existiría en el terreno al aplicarse una carga. Esta resistencia se debe a la cohesión (comportamiento plástico de las partículas de una muestra) y el ángulo de fricción interna o rozamiento entre las partículas granulares.

En base a la información geotécnica recopilada en las calicatas se realiza la clasificación SUCS de los suelos. Esta clasificación fue propuesta por Arturo Casagrande y sus modificaciones fueron realizadas en el año 1942, siendo actualmente la más utilizada a nivel mundial para la clasificación de suelos desde un punto de vista geotécnico. La SUCS clasifica a los suelos en:

- Suelos de grano grueso
- Suelos de grano fino
- Suelos orgánicos

Los suelos de grano grueso y fino se distinguen mediante el tamizado del material por el tamiz No. 200. Los suelos de granos gruesos corresponden a los retenidos en dicho tamiz y si representan más del 50%, los suelos son clasificados como tal, caso contrario son considerados como suelos de grano fino. Cada tipo de suelo se designa por símbolos de grupo acompañados de un prefijo y un sufijo. Los prefijos son las iniciales de los nombres en inglés de los seis principales tipos de suelos (grava, arena, limo, arcilla, suelos orgánicos de grano fino y turbas); mientras que, los sufijos indican subdivisiones en dichos grupos:

<i>G = Grava</i>	<i>C = Arcilla</i>	<i>L = Baja plasticidad</i>
<i>S = Arena</i>	<i>O = Limo o arcillas Orgánicas</i>	<i>W = Bien graduado</i>
<i>M = Limo</i>	<i>H = Alta plasticidad</i>	<i>P = Mal graduado</i>

La segunda muestra debe ser utilizada para el análisis de corte directo; es decir, realizar la aplicación de cargas diferenciadas hasta que la muestra falle, lo cual permite determinar la capacidad portante del suelo (capacidad admisible última). Si la muestra de suelo es grava sin contenido de arena y no es posible aplicar el ensayo de corte directo, se aplica el de densidad máxima y en ambos casos, se estima el valor de capacidad portante.

7.5.- Estudios sísmicos y geofísicos

Estos estudios consideran la recolección, en campo de información sísmica y geofísica, además de la aplicación de técnicas y metodologías orientadas a conocer el comportamiento dinámico del suelo y/o sus propiedades físicas.

.- **Técnica de H/V:** considera como hipótesis de base que las vibraciones ambientales o microtemores generadas por la actividad humana se deben principalmente a la excitación de las capas superficiales al paso de ondas superficiales del tipo Rayleigh. El registro de esta información y su interpretación, permite conocer el periodo natural de vibración del suelo y el factor de amplificación, parámetros que definen su comportamiento dinámico ante la ocurrencia de eventos sísmicos. Estos resultados son correlacionados y complementados con los obtenidos de los estudios geofísicos, geológicos, geomorfológicos, geodinámicos y geotécnicos. Para los registros de vibración ambiental se utiliza el equipo sísmico compuesto por un registrador tipo CitySharp y sensores de tres componentes de registro tipo Lennartz (Figura 9).



Figura 9: Equipo sísmico utilizado para el registro de vibraciones ambientales en Cerro Azul: sensores Lennartz (2N) y registrador CityShark

En la Figura 10, se muestra la disposición del equipo sísmico al momento del registro de información, además de ejemplos de señales de vibración ambiental. La señal registrada en el punto AZ-043 presenta bajos niveles de ruido; mientras que, la señal en AZ-102, presenta diversidad de pulsos de variada amplitud (ruido), que al momento de su análisis, pueden ser filtrados, para no afectar a la información a utilizarse en el estudio.

Con la información disponible, se procede a construir las razones espectrales H/V (registros de las componentes horizontales / registros en la componente vertical) a fin de identificar las frecuencias predominantes y amplificaciones relativas que caracterizan al tipo de suelo presente en el área de estudio (ver Figura 11), las mismas que están definidas por las condiciones geológicas y geomorfológicas de las primeras decenas de metros por debajo de la superficie. Debe entenderse que la variación de las propiedades físicas de cada capa estratigráfica superficial de diferente espesor, geometría y composición litológica, causaran o no, la amplificación de las ondas

sísmicas incidentes, propiedad que es utilizada para conocer las características físicas del suelo.

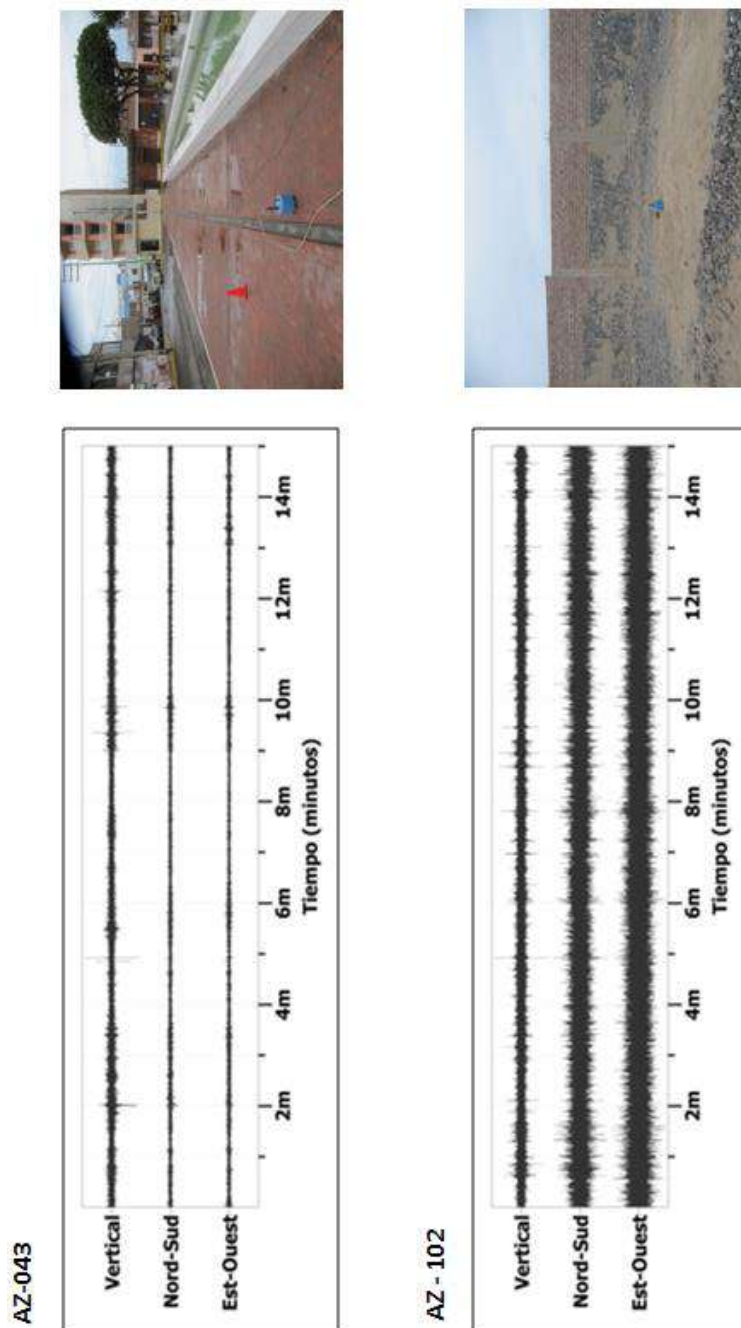


Figura 10: Ejemplos de la disposición del equipo sísmico para el registro de vibraciones ambientales. Ejemplos de registros de vibración ambiental obtenidos sobre un punto de registro sin presencia de ruido de fondo (AZ-043) y otro con ruido transitorio (AZ-102). Obsérvese las diferentes amplitudes de la señal registrada en cada punto.

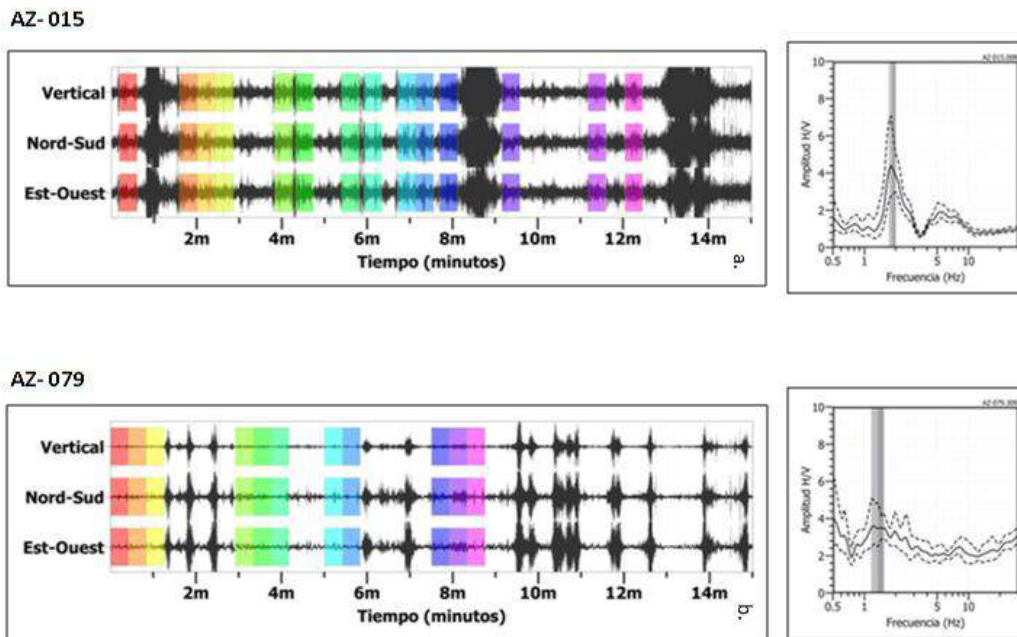


Figura 11: Ejemplo de selección de ventanas de registro de vibración ambiental (rectángulos de colores) y gráficos de H/V. AZ-015: Registros y razón H/V donde se identifica la presencia de dos pulsos de frecuencia predominante. AZ-079: Registros y razón H/V en el cual se observa un posible pico predominante de pequeña amplitud. Las líneas gruesas en los gráficos H/V indican el promedio de las curvas de razones espectrales y las líneas discontinuas su desviación estándar.

Para aplicar la técnica H/V, se considera la siguiente secuencia:

- Los registros de vibración ambiental son tratados por ventanas 20 segundos de señal no perturbada por el ruido de fondo. Para tal efecto, se selecciona de manera aleatoria, diversos tramos de señal sin la presencia de ruidos transitorios.
- Se calcula la Transformada Rápida de Fourier para un número mayor a 10 ventanas de observación para cada punto.
- .- Los espectros horizontales de la señal se divide entre el espectro vertical para obtener la relación H/V y luego se promedia los valores para cada punto de observación, considerando su respectiva desviación estándar. Luego se procede a identificar la frecuencia predominante considerando, como condición, presentar una amplificación relativa mayor a 2 veces.

Para definir la frecuencia predominante se consideraron tres criterios (Lermo y Chávez-García -1994 a,b; Lachet y Bard, 1994): primero, debe estar presente en un

rango de interés que fluctúa entre 1 a 20 Hz; segundo, debe presentar amplificaciones relativas de al menos 2 veces (se considera la amplitud de “1” como punto de referencia) y por último, se considera el pico/rango de frecuencias más representativos para cada punto de medida.

Finalmente, para la presentación de los resultados, las frecuencias son expresadas en periodos dominantes.

.- **Método de arreglos lineales:** Se hace uso de tendidos lineales de 24 sensores sísmicos a fin de registrar ondas de volumen y superficiales generadas por fuentes artificiales. Con este procedimiento se pretende conocer la velocidad de las ondas de corte (ondas S) utilizando el método MASW; es decir, conocer los cambios de velocidades a lo largo de los diversos estratos existentes en el subsuelo (Figura 12).

La aplicación de esta técnica permite determinar las características físicas del subsuelo de manera indirecta, basándose en el comportamiento de las ondas sísmicas al pasar por distintos medios, permitiendo de este modo, definir el perfil de velocidades de las ondas de corte (V_s) que caracteriza a dicha línea. La interpretación de la información recolectada proporciona una curva de dispersión (velocidad de fase de las ondas superficiales versus la frecuencia) para las ondas superficiales, ya que estas conservan hasta el 90% del valor de la velocidad de las ondas de corte (V_s). Luego mediante un procedimiento de cálculo iterativo inverso se obtiene el perfil de velocidad de las ondas de corte (V_s) para el punto medio de cada línea de estudio. La aplicación de un nuevo cálculo iterativo inverso, permite conocer el periodo predominante teórico correspondiente al perfil de velocidades, el cual es correlacionado con el obtenido con la técnica H/V a fin de validar ambos resultados.

.- **Método de prospección eléctrica:** Tiene por objetivo determinar la distribución real del parámetro resistividad del subsuelo hasta un cierto rango de profundidad a lo largo de un perfil de medida. Para ello se considera los valores de resistividad aparente obtenidos mediante medidas realizadas por métodos convencionales de corriente continua. En este estudio se considera solo los perfiles realizados en la superficie del terreno (Figura 13).

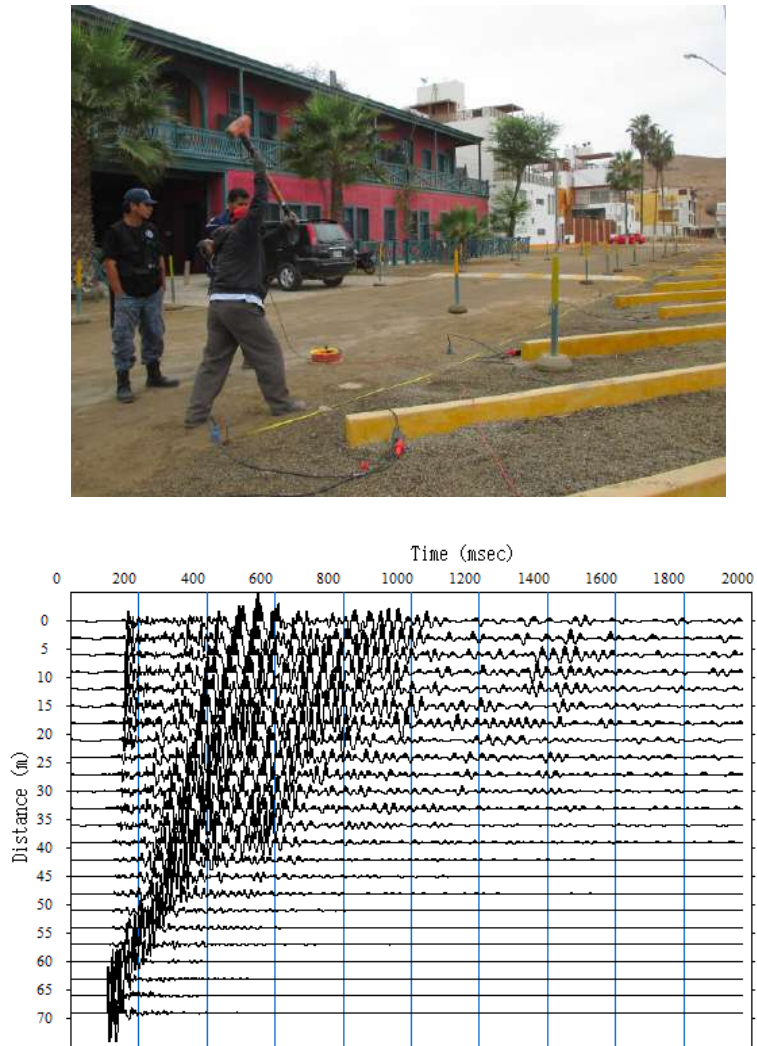


Figura 12: Disposición del equipo de refracción sísmica y trazas obtenidas en la ciudad de Cerro Azul

Para el análisis de la información obtenida en campo se ha procedido con su calificación en función de la diferencia del potencial con relación al valor de Intensidad de corriente en cada punto de lectura y en conjunto. Este procedimiento permite eliminar la posible influencia de corrientes externas que afecten los valores de resistividad aparente. El procesamiento de los datos (I : intensidad de corriente, V_p : diferencia de potencia y K : constante geométrica del dispositivo), permite conocer los valores de Resistividad y su configuración en el subsuelo, incluyendo la corrección por topografía. La profundidad de investigación depende del dispositivo empleado de acuerdo al interés del estudio.



Figura 13: Disposición del equipo de prospección eléctrica en la ciudad de Cerro Azul

La interpretación de la información considera todos los factores posibles que puedan influir en los resultados; es decir, grado de saturación del terreno, porosidad y la forma del poro, la salinidad del fluido, el tipo y composición de la roca, la temperatura, los procesos geológicos que afectan a los materiales y la presencia de materiales arcillosos con alta capacidad de intercambio catiónico. Considerando la existencia de una estrecha relación entre la resistividad eléctrica y el grado de saturación del terreno, es posible definir la posible ubicación de las áreas de filtración y las zonas saturadas en el subsuelo. De existir incrementos de fluidos en el terreno estos se verán reflejados por una disminución en los valores de resistividad.

En este estudio se considera 5 rangos de resistividad (Muy alto resistivo, Alto resistivo, resistivo, bajo resistivo y muy bajo resistivos), los cuales presentan las siguientes características:

.- Muy Alto Resistivo (color rojo): Comprende valores mayores a 1500 ohm.m. Se considera dentro de este grupo a rocas ígneas y metamórficas, y dentro de las sedimentarias, a los conglomerados. Debe considerarse que estos materiales estarán bajo condiciones de ausencia de agua, pero si hay presencia de arcilla, su grado de alteración permitiría la disminución en los valores de resistividad del suelo.

.- Muy Alto Resistivo (color rojo): Comprende valores mayores a 1500 ohm.m. Se considera dentro de este grupo a rocas Ígneas y metamórficas, y dentro de las sedimentarias, a los conglomerados. Un factor importante a señalar es que estos materiales estarán bajo condiciones de ausencia de agua; sin embargo, si hay presencia de arcilla, su grado de alteración permitiría la disminución en los valores de resistividad del suelo.

.- Alto Resistivo (color anaranjado): Comprende valores entre los 500 y 1500 ohm.m. Se considera dentro de este grupo a las rocas sedimentarias, ya sean de origen detrítico o químico. Asimismo, incluye a los suelos con muy baja composición de materiales orgánicos.

.- Resistivo o Resistividad Moderada (color verde): Comprende valores entre los 100 y 500 ohm.m. Dentro de este grupo se considera a suelos sedimentarios de composición variada; es decir, arenas, arcillas y limos, cada vez con mayor contenido de materiales orgánicos.

.- Bajo Resistivo (color celeste): Comprende valores entre los 20 y 100 ohm.m. Según Loke (2001), estas resistividades corresponden a suelos saturados de agua y su variación depende de la relación existente entre la resistividad, porosidad y la permeabilidad de los materiales. Así mismo, se puede considerar dentro de este grupo a los suelos orgánicos, arcillosos, limosos y aquellos con contenido de carbón, los cuales se comportan como buenos conductores de corriente.

.- Muy Bajo Resistivo (color azul): Comprende valores menores a 20 ohm.m. y estos están referidos a suelos con presencia de agua, material orgánico, arcillas. Se debe considerar que el grado de salinidad del agua afecta los valores de resistividad, permitiendo que estos alcancen valores del orden del 0.2 Ohm.m., equivalente al agua de mar.

El resultado final para este tipo de estudio, es una imagen distancia-profundidad con la distribución de la resistividad real del subsuelo, fácilmente comprensible en términos geológicos y geotécnicos.

8.- ASPECTOS SISMOLÓGICOS

El distrito y la ciudad de Cerro Azul se encuentran ubicados en el borde occidental de la región central del Perú; por lo tanto, ha sido, es y será afectada en el tiempo por sismos de variada magnitud que pueden o no causar daños en superficie. Desde este punto de vista, es importante conocer las características de la actividad sísmica en la región, ya que puede presentarse el escenario de que sismos de gran magnitud generen tsunamis. Del mismo modo, se debe estimar de manera probabilística los posibles valores de aceleración a presentarse en el futuro ante la ocurrencia de sismos de gran magnitud a fin de que sean considerados en los nuevos proyectos asociados al desarrollo urbanístico de la ciudad.

8.1.- Sismicidad

El borde occidental del Perú, se constituye como la principal fuente generadora de sismos y tsunamis, siendo los de mayor magnitud los que han causado grandes niveles de daños y pérdidas de vidas humanas. Dentro de este contexto, el borde occidental de la región central presenta actividad sísmica de tipo superficial (profundidad menor a 60 km) e intermedia (profundidad entre 61 y 350 km), siendo los primeros de mayor peligro debido a que frecuentemente alcanzan magnitudes elevadas y al tener sus focos cerca de la superficie, producen daños y efectos importantes en las ciudades costeras, y una de estas ciudades es Cerro Azul (Figura 14).

Según información histórica, los sismos que probablemente causaron daño y destrucción en el área urbana de Cerro Azul fueron los siguientes (Silgado, 1978):

- .- Los Terremotos de Lima y Callao de 1687, ocurrieron el 20 de octubre de 1687, asolando toda la costa central del Perú, entre Chancay y Pisco. Fueron dos sismos de gran intensidad, el primero se produjo a las 4:15 de la mañana y el segundo a las 5:30 aproximadamente, al que siguió un tsunami que arrasó el puerto del Callao y otras localidades costeras. En Lima murieron unas 100 personas, aparte de otras en varias localidades costeras ubicadas entre Chancay y Pisco. Estas mismas localidades habrían sido también inundadas por*

- .- En 1966, otro terremoto con epicentro frente a la zona costera de Chancay causó graves daños al llamado Norte Chico, y en el área de Lima-Callao. El terremoto se sintió fuerte en la zona sur de Lima hasta la ciudad de Cañete. En la catedral del Callao, mientras se celebraba una ceremonia 24 personas murieron al caer parte de paredes, también se produjo un moderado tsunami que causó graves daños en el Callao y en Pucusana. En total el sismo cobró 200 vidas, de las cuales 100 murieron en Lima-Callao.*
- .- Recientemente, en el año 2007 el departamento de Ica y la provincia de Cañete fue afectada por un sismo de gran magnitud que ocasionó la destrucción de muchas viviendas en Cerro Azul, además de un tsunami que produjo daños parciales a bienes de propiedad de los pescadores locales. Este sismo y tsunami deben ser considerados por las autoridades y población en general, como el preámbulo de escenarios mayores de podrían generar sismos de mayor magnitud y con epicentros cercanos a la ciudad. Es importante que la población de Cerro Azul comprenda que los sismos y tsunamis son cíclicos en el tiempo y la única manera de sobrevivir es preparándose a fin de hacerse menos vulnerable.*

El sismo del año 2007 produjo en la ciudad de Cerro Azul intensidades del orden de VII en la escala de Mercalli Modificada, produciéndose daños en viviendas construidas con material de adobe y/o muy antiguas. En la zona del puerto, la mar se retiró hasta 50 metros antes de la llegada de las primeras olas del tsunami, Figuras 15.

Según la historia sísmica de los departamentos de Lima e Ica, son muchos los terremotos que en el pasado afectaron a sus diversas ciudades y localidades, entre ellas la ciudad de Cerro Azul por encontrarse cercana a la línea de costa. Sin embargo, no existen reportes que detalle estos sucesos y ello podría deberse a su escasa o dispersa población en varios núcleos urbanos, característica típica desde su creación. Sin embargo, en la Figura 16 se presenta el mapa de intensidades regionales para el periodo histórico (1400 – 1900) e instrumental (1961 – 2014), observándose que la zona costera de la región central fue afectada en el pasado por sismos que produjeron intensidades del orden de VIII-XI (MM); por lo tanto, Cerro Azul es una ciudad expuesta a alto riesgo para el caso de sismos y tsunamis.

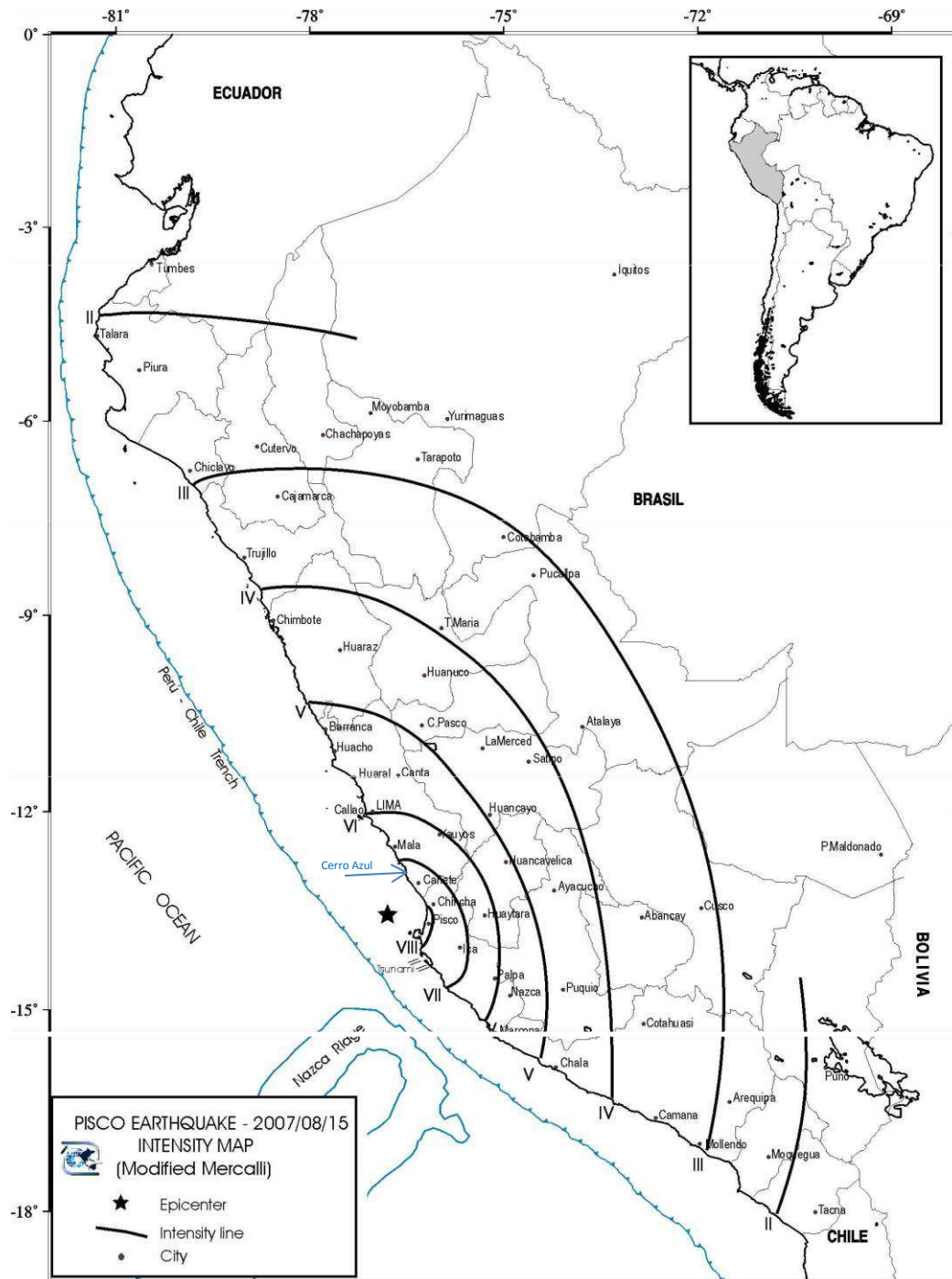


Figura 15: Mapa de isosistas para el terremoto del año 2007 que afectó a la ciudad de Cerro Azul con intensidades del orden de VII en la escala de Mercalli Modificada

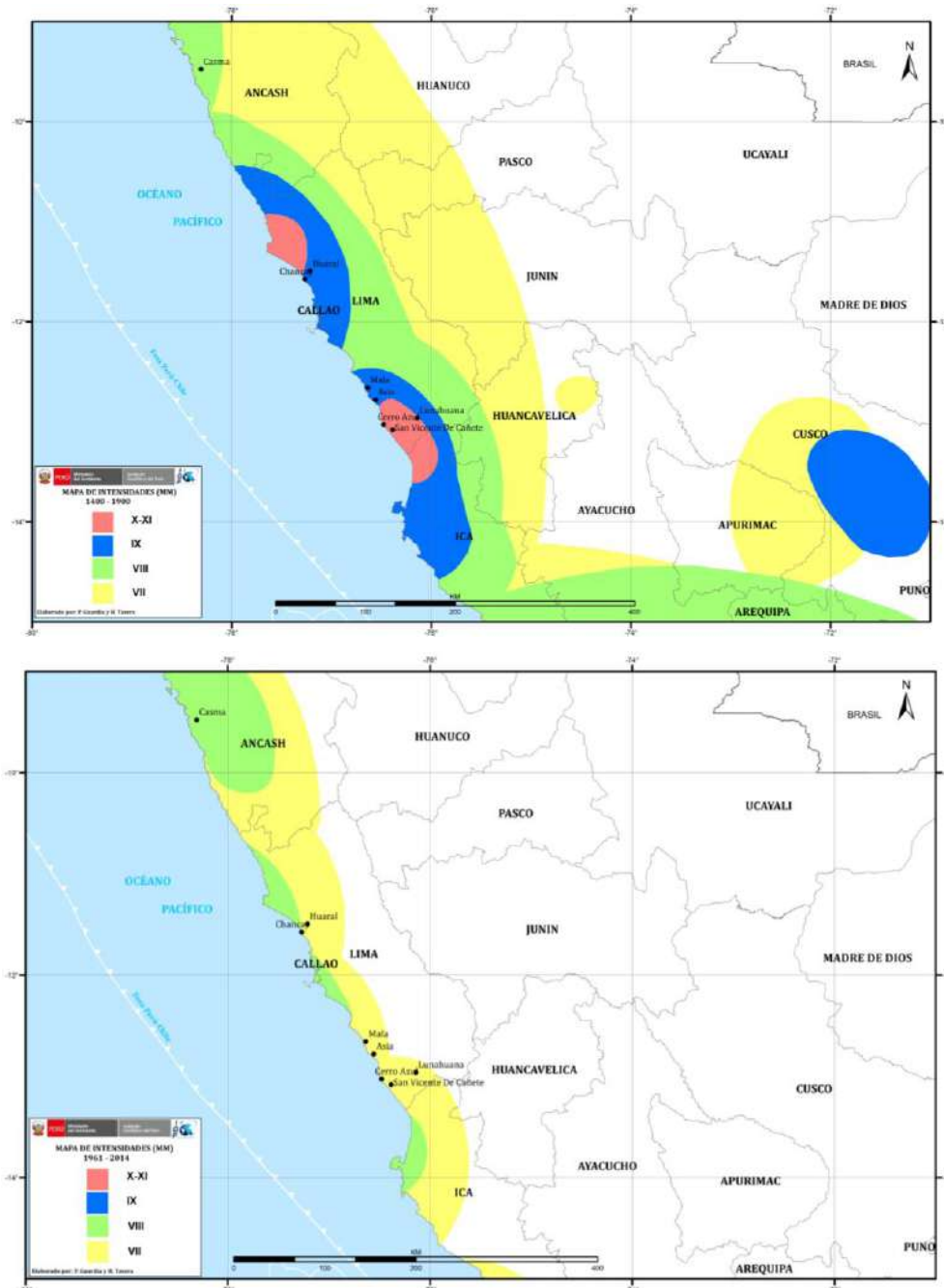


Figura 16: Mapas de isosistas (MM) correspondientes a sismos históricos (1400 – 1900) e instrumentales (1961 – 2014) ocurridos en el borde occidental de la región central del Perú

Por otro lado, en reciente informe elaborado por Tavera (2014), se indica que de acuerdo al monitoreo de la actividad sísmica y deformación cortical, se ha identificado en el borde occidental de la región central del Perú la existencia de dos importantes asperezas y/o zonas de acoplamiento sísmico que darían origen, en un futuro, a un sismo de magnitud del orden de 8.5 Mw (A-1 en la Figura 17). Esta información es corroborada por estudios realizados por Villegas-Lanza et al (2015) sobre la distribución de asperezas en el borde occidental del Perú. De acuerdo a estos

estudios, el sismo sería comparable al ocurrido en el año 1746 y que afectó con intensidades mayores a VIII (MM) a todas las ciudades y/o localidades ubicadas en la zona costera, desde Arequipa por el sur, hasta Chiclayo por el norte. En este escenario, la ciudad de Cerro Azul podría soportar intensidades del orden de VIII (MM), pudiendo afectar a un gran número de viviendas de la ciudad. A fin de tener información más cuantitativa sobre los posibles daños a presentarse en la ciudad de Cerro Azul, se debe complementar este estudio con evaluaciones catastrales y estructurales.

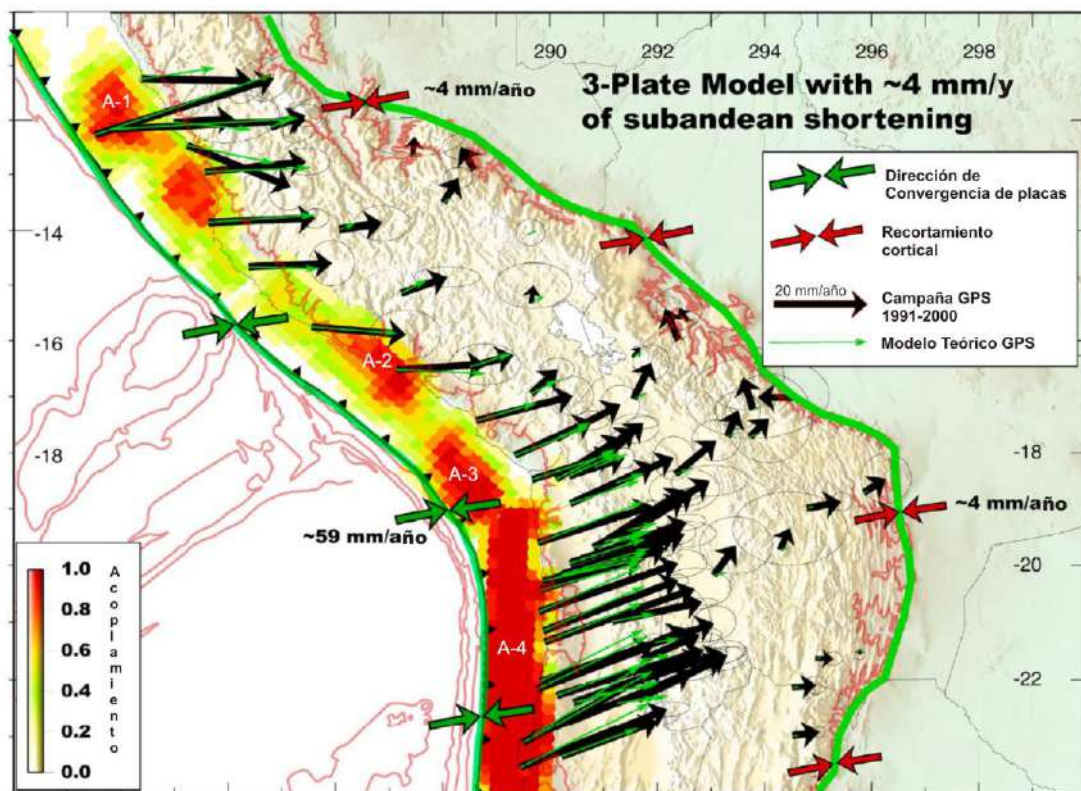


Figura 17: Mapa de asperezas y/o zonas de acoplamiento sísmico en el borde occidental de Perú-Chile obtenido a partir de datos de GPS y sísmicos. Las flechas negras corresponden a las medidas GPS in situ y las verdes a las obtenidas con el modelo teórico. La buena correlación sugiere la existencia de hasta cuatro asperezas (Chlieh et al, 2011).

8.2.- Peligro sísmico

Esta metodología permite conocer, en términos de probabilidad, la severidad sísmica con la cual podría ser sacudida un área en un determinado lapso de tiempo. Este parámetro es expresado en términos de aceleración y para tal efecto, se hace uso del catálogo sísmico y fuentes sismogénicas definidas por el Instituto Geofísico del Perú (Tavera et al, 2014), las ecuaciones de atenuación definidas por Young et al

(1997) para fuentes de subducción y de Sadigh et al (1997) para las fuentes continentales. El algoritmo utilizado para el cálculo del peligro sísmico es el CRISIS-2007 (Ordáz et al, 2007).

Para el área que abarca la ciudad de Asia se obtiene, para un periodo de retorno de 50 años con el 10% de excedencia, valores de aceleración entre 420 a 440 gals (Figura 18), equivalentes a intensidades del orden de VII-VIII (MM); es decir, suficientes como para producir daños estructurales, deslizamientos y posibles escenarios de licuación de suelos.

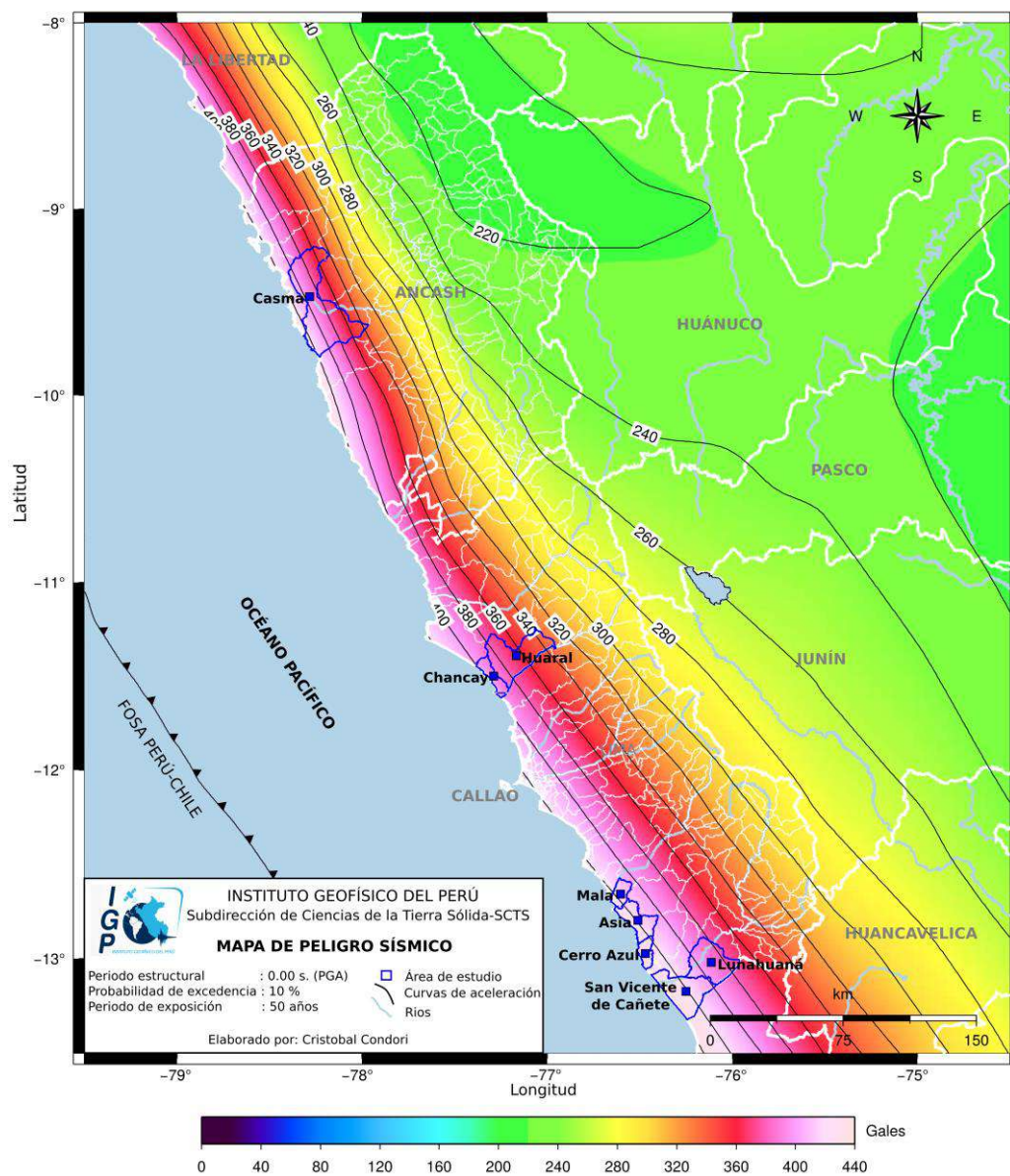


Figura 18: Peligro Sísmico para el borde occidental de la región central del Perú correspondiente a un periodo de retorno de 50 años con el 10% de excedencia.

8.3.- Tsunamis

La información histórica sobre tsunamis ocurridos en la región central del Perú y que afectaron, en diferente grado, a las zonas costeras es bastante numerosa y puede ser consultada en Silgado (1978) y Carpio y Tavera (2002). En general, todos los sismos que generaron tsunamis presentaron magnitudes superiores a 7.0 Mw y llegaron a afectar toda la zona costera del departamento de Lima con olas de hasta 8 metros de altura. Según información histórica, los tsunamis inundaron habrían inundado las zonas de playa de Asia sin producir mayores daños en razón que para los años de ocurrencia no se contaba con población cercana a la playa, situación que ha cambiado considerablemente al año 2016. A la fecha, en la zona costera del distrito de Cerro Azul se ha incrementado el número de viviendas y los centros comerciales, siendo mayor la población durante la estación de verano, situación que se hace crítico para cualquier escenario por tsunami

Para generar escenarios probables de tsunamis en la zona costera de la ciudad de Cerro Azul (Figura 19), se considera la metodología de modelamiento numérico haciendo uso de la siguiente información:

.- Datos topográficos y batimétricos: Los datos de batimetría local provienen de las cartas 224, 225 y 2245, además de sondajes realizados por la Dirección de Hidrografía de la Marina de Guerra del Perú (DHN), siendo su muestreo de 30 metros. La topografía local fue construida a partir del levantamiento topográfico in situ con una resolución de 10 metros.

.- Modelo de fuente sísmica: Se considera como escenario un sismo de magnitud 8.5 Mw con epicentro frente a la zona costera de Cerro Azul y sus parámetros, así como la orientación de la fuente sísmica, fueron tomados del sismo ocurrido en el año 1966 (sismo de Lima). Otros parámetros, como las dimensiones del área de ruptura fueron estimadas utilizando las relaciones de Papazachos (2004).



Figura 19: Vista panorámica de la zona de playa de la ciudad de Cerro Azul con presencia de viviendas y comercio.

.- Modelado numérico de tsunamis, TUNAMI-N2: El proceso de modelado numérico requiere tener el conocimiento sobre los procesos físicos de las tres fases de un tsunami: generación, propagación e inundación. Para el modelado se utiliza el algoritmo TUNAMI-N2 (Goto y Ogawa, 1992). Para una determinada condición de la fuente sísmica, el modelo TUNAMI-N2 simula la generación, propagación e inundación del tsunami con una exactitud bastante alta (comparación con muchos tsunamis históricos). Así mismo, proporciona información sobre el tiempo de arribo de la primera ola y su altura en una determinada región costera, además de los niveles de inundación horizontal.

Los resultados obtenidos en la simulación numérica del tsunami indican que las primeras olas llegarían a la zona costera de Cerro Azul y alrededores en 18 a 20 minutos después de ocurrido el sismo y con alturas del orden de 6 metros entre playa La Costa y Punta Centinela. Asimismo, las olas tendrían alturas de 5 metros en el Muelle Cerro Azul, playa El Hueso y playa Cerro Azul, de 4 metros en la playa Los Reyes (Figura 20).

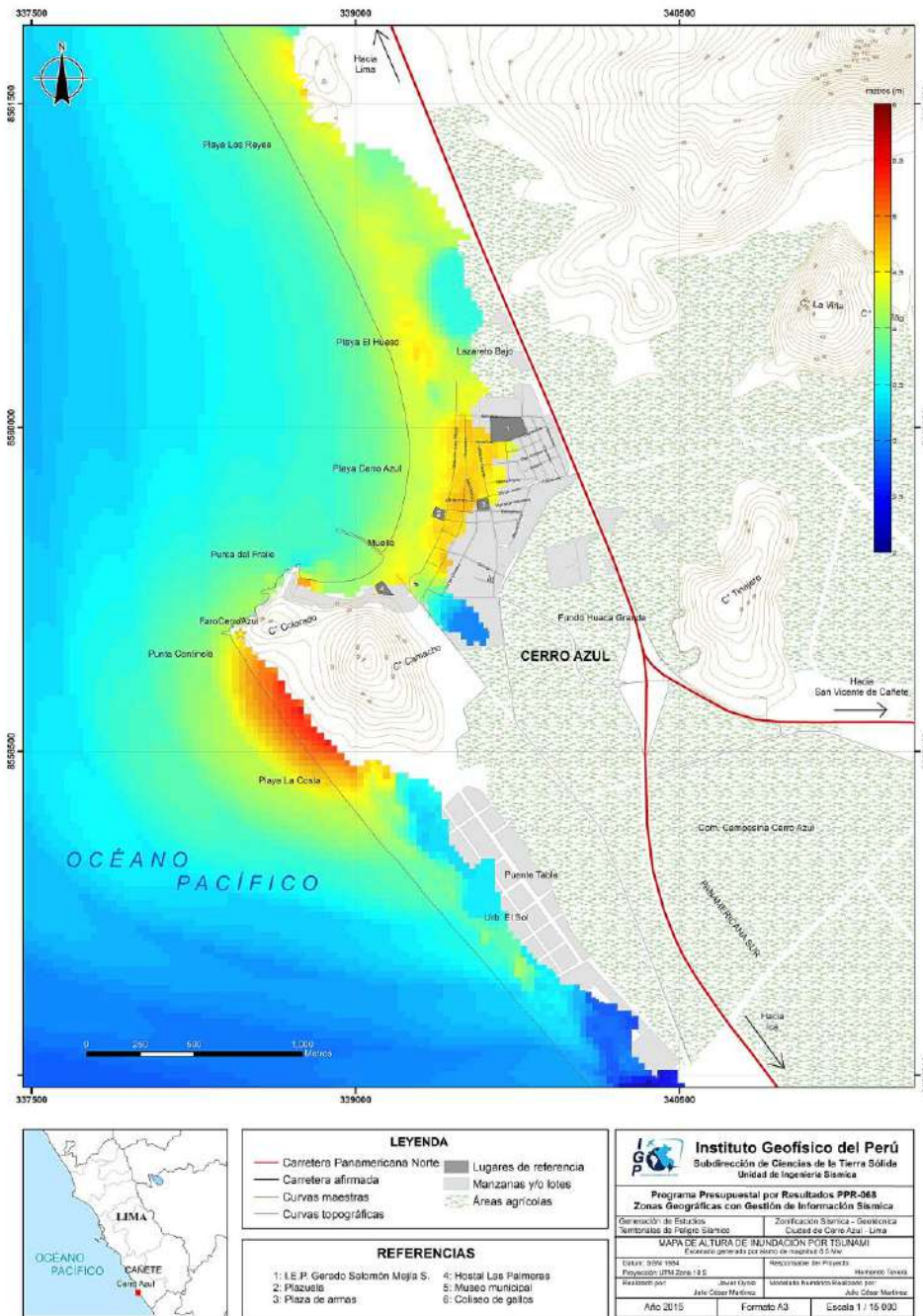


Figura 20: Altura de inundación por tsunami en la zona costera de la ciudad de Cerro Azul y alrededores

En relación a los niveles de inundación, en la Figura 21 se observa que el tsunami alcanzaría distancias de 650 metros a la altura del Muelle Cerro Azul, 500 metros a la altura de la playa El Hueso, de 450 a 200 metros en las playas Los Reyes, Cerro Azul y La Costa, además de la Urb. El Sol.

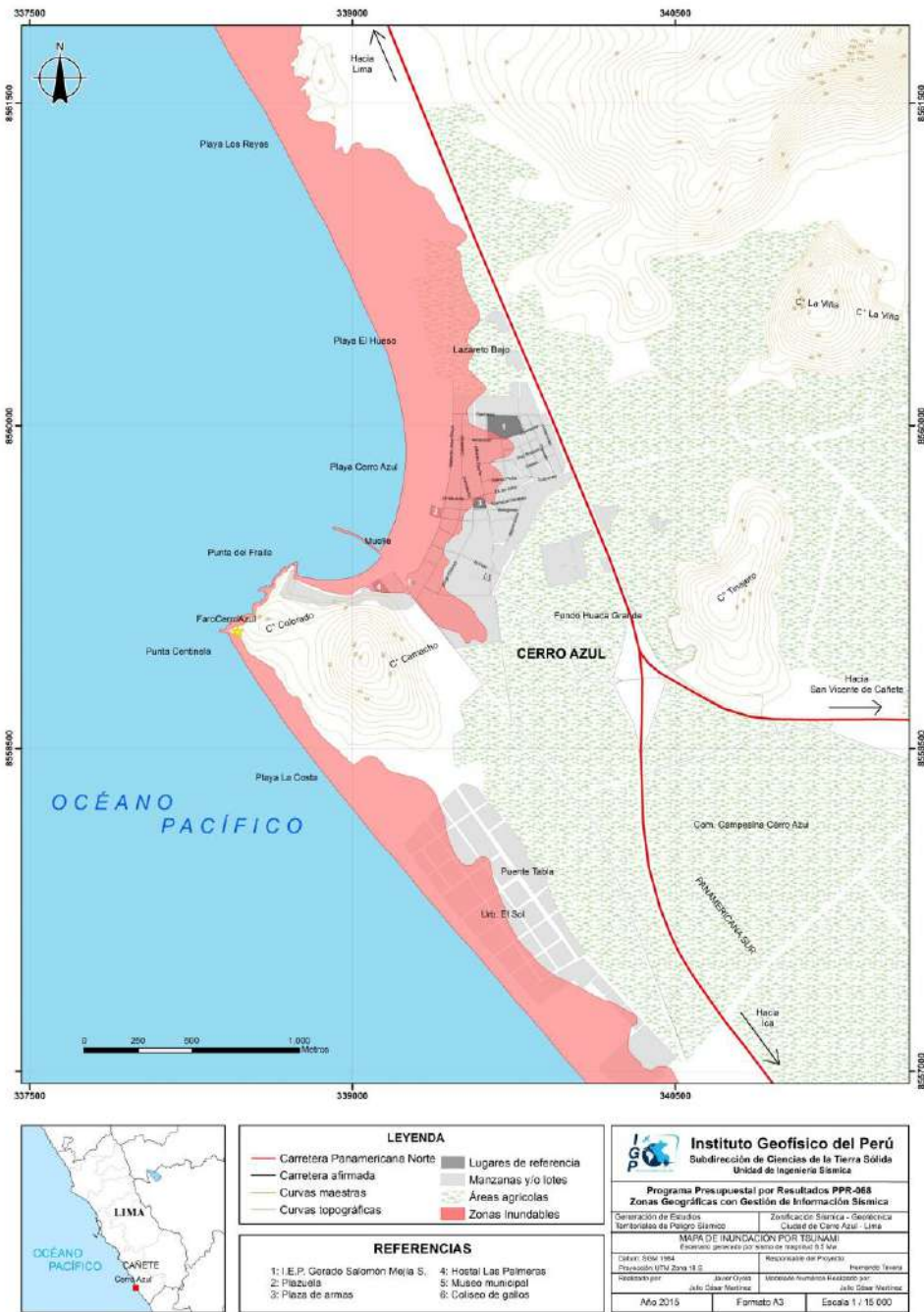


Figura 21: Inundación horizontal por tsunami en la zona costera de la ciudad de Cerro Azul y alrededores

9.- GEOMORFOLOGÍA, GEOLOGÍA Y GEODINÁMICA

9.1. Geomorfología

Los rasgos geomorfológicos presentes en la ciudad de Cerro Azul y alrededores son el resultado de la interacción de fuerzas endógenas y exógenas. Las primeras actúan como fuerzas creadoras de las grandes elevaciones y depresiones formadas principalmente por movimientos de componente vertical y las segundas, como desencadenantes de una continua denudación que tiende a rebajar el relieve originado, estos últimos llamados procesos de geodinámica externa que se agrupan en la cadena de meteorización-erosión, transporte y sedimentación (Gutiérrez, 2008).

Para este estudio, en base a la topografía de terreno y al uso de herramientas computacionales como SIG y CAD, se ha elaborado el mapa digital de terreno y plano de pendientes a fin de delimitar las características del terreno, las mismas que fueron verificados y validados durante el trabajo de campo realizado en la ciudad de Cerro Azul. El modelo digital del terreno (MDT), representa a una superficie en 3D construida para un área de 17 km², y se concluye que la zona urbana de la ciudad de Cerro Azul se asienta sobre un relieve con una altitud mínima de 20 m.s.n.m. y máxima de 30 m.s.n.m.. En los alrededores, hacia el extremo NE de la ciudad se observa la presencia de relieves empinados que alcanzan alturas de 60 m.s.n.m. (Figura 22).

Por otro lado, el plano de pendientes representa los diferentes grados de desnivel del terreno; es decir, identifica las geoformas del terreno en razón que influye en la formación de los suelos y condiciona el proceso erosivo, cuanto más pronunciada sea la pendiente, la velocidad del agua de escorrentía será mayor, no permitiendo la infiltración del agua en el suelo (Belaústegui, 1999). El mapa de pendientes para la ciudad de Cerro Azul fue desarrollado a partir del MDT y para la clasificación de los rangos de pendientes se utilizó como fuente el Boletín N° 29 Serie C publicado por INGEMMET (2006). Según esta información, la ciudad de Cerro Azul se encuentra ubicada sobre terrenos cuyas pendientes son del orden de 5° (250 Ha aproximadamente); mientras que, en los alrededores, lomas Bellavista y Parihuanco, las pendientes son de 35° a 50° (Figura 23).

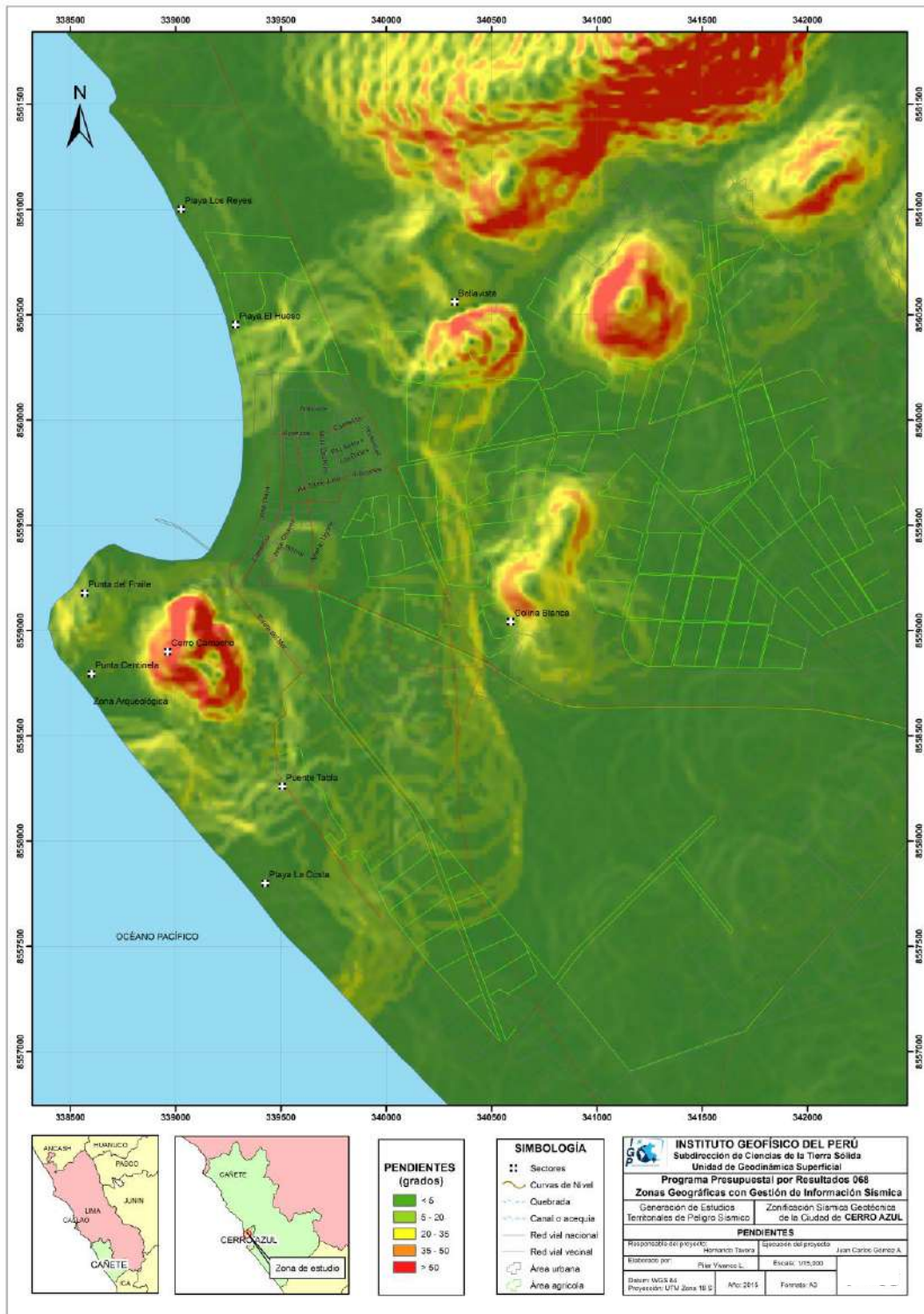


Figura 23: Mapa de pendientes para la ciudad de Cerro Azul y alrededores

9.1.1. Unidades geomorfológicas

En el área sobre la cual se emplaza la ciudad de Cerro Azul se ha identificado la existencia de 3 unidades geomorfológicas y de acuerdo a su origen fueron clasificados en (Figura 24):

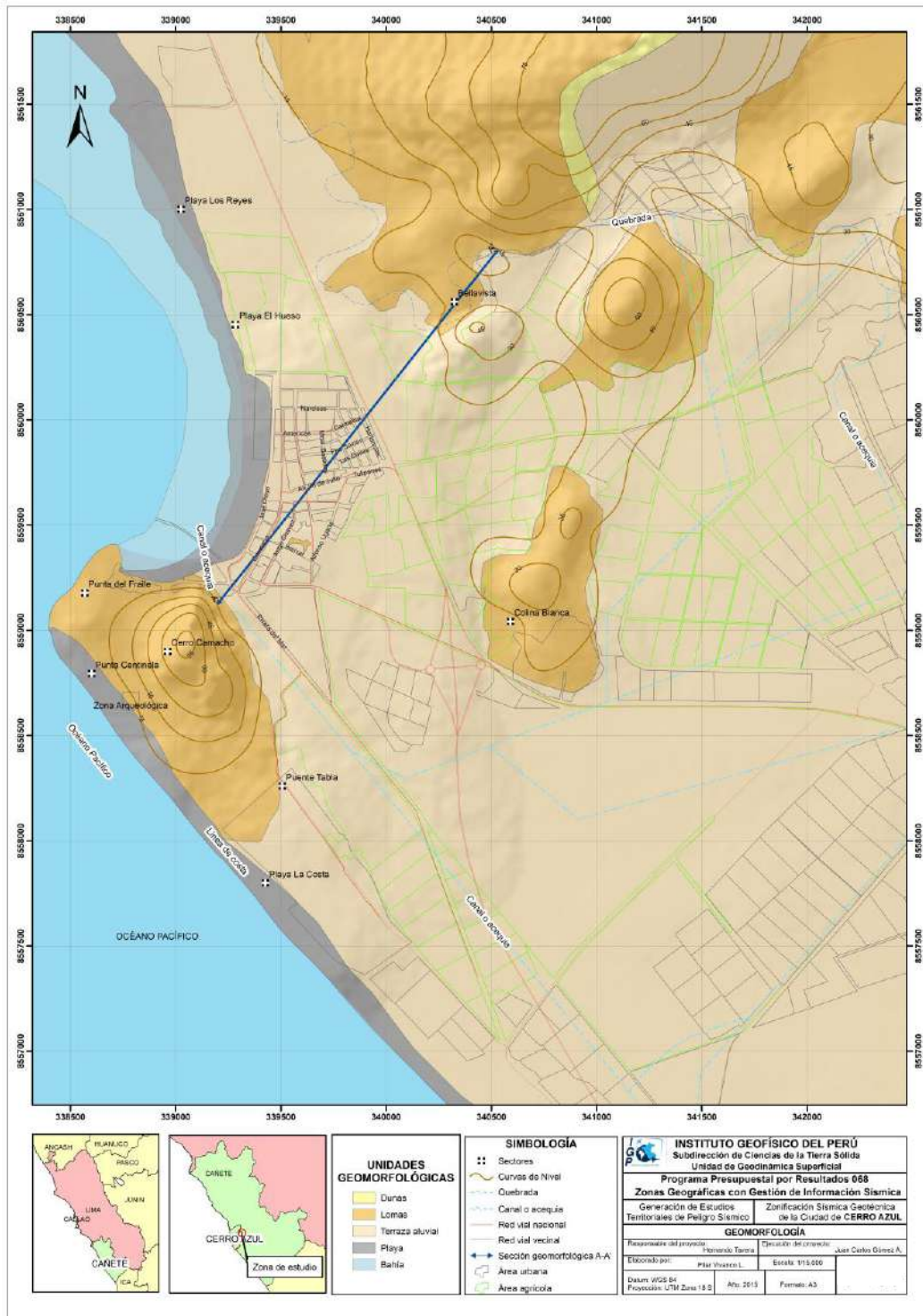


Figura 24: Mapa geomorfológico de la ciudad de Cerro Azul y alrededores

9.1.1.1.- Origen denudacional

Todas las tierras emergidas, sean por procesos orogénicos o epirogénicos, constituyen el estado inicial de un gran ciclo de denudación, el mismo que comprende un conjunto de procesos (meteorización y/o erosión) que determinan la degradación o erosión de la superficie del terreno. Los procesos de denudación actúan sobre cualquier tipo de roca sin considerar su estructura o composición, y a la vez aceleran o retardan los procesos de desgaste de la misma. En la ciudad de Cerro Azul se ha desarrollado el modelado de geoformas en rocas intrusivas debido al accionar de agentes como el agua y el viento, dando lugar a la formación de lomadas.

*. - **Lomas:** Corresponden a elevaciones del terreno con desnivel menor a 300 m., así como, pendientes entre 30° y 35°. Se caracterizan por tener configuración basal alargada y dos vertientes que se inclinan en dirección opuesta. Estas geoformas han sido modificadas por la acción del viento (erosión eólica), escorrentía de las aguas superficiales y la actividad antrópica. Esta unidad ocupa el 13 % de la superficie de la ciudad. Se encuentra en el extremo NE de la ciudad, sector Bellavista; también al Este en el sector Colina Blanca conocido como con el mismo nombre y hacia el Sur a 700 m del centro urbano de Cerro Azul, se encuentra la loma denominada Camacho, Figura 25.*

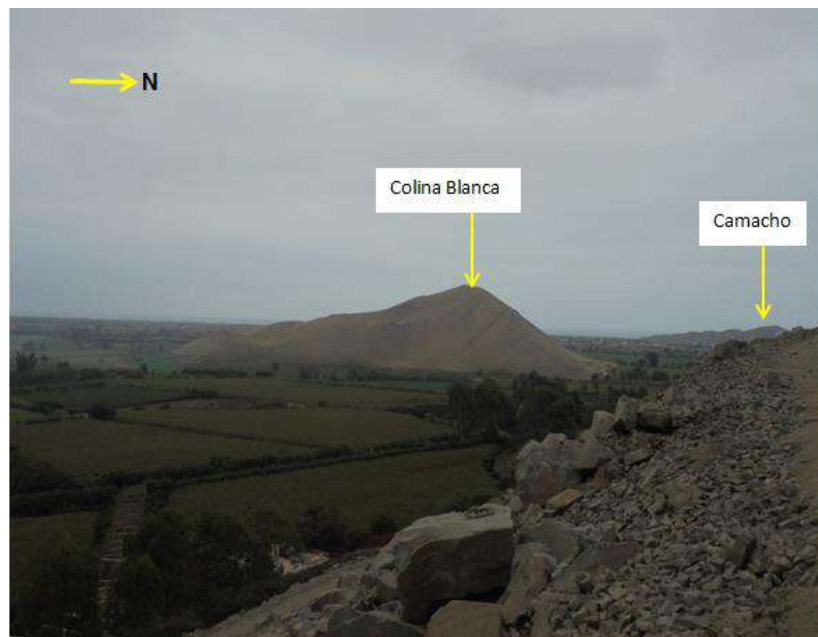


Figura 25: Principales elevaciones que rodean a la ciudad de Cerro Azul.

9.1.1.2.- Origen deposicional

Comprende geoformas resultantes de la deposición de fragmentos o sedimentos originados durante los procesos de erosión de rocas preexistentes y cuyos materiales han sido transportados y acumulados en áreas geográficas generalmente de baja pendiente. Entre las unidades geomorfológicas directamente relacionadas con la dinámica fluvial, eólica y marina se encuentran las siguientes:

*.- **Terraza aluvial:** Superficie horizontal o ligeramente inclinada, cuyo relieve presenta pendientes menores a 7°. Generalmente, se encuentran conformados por materiales heterogéneos (clastos angulosos a subredondeados de origen intrusivo envueltos en matriz arenosa y/o fina). Estos materiales han sido erosionados de la parte media de la cuenca y transportados en forma de flujo a través de las quebradas Río Chico y Río Grande de Asia hasta depositarse en zonas de menor pendiente. Sobre esta geoforma se asienta la ciudad de Cerro Azul (área urbana y agrícola). Esta unidad ocupa el 80 % de la superficie de la ciudad de Cerro Azul, Figura 26.*



Figura 26: Abanico aluvial sobre el cual se asienta la ciudad de Asia (línea de color amarillo).

*.- **Dunas:** Las acumulaciones eólicas son depósitos de arena que resultan de la sedimentación de partículas transportadas por el viento predominante que llega*

desde el Océano Pacífico en dirección oeste-este. Presentan alturas máximas de 2.00 m. y mínimas de 1.50 m. Las dunas presentan extensiones de 10 a 489 m. aproximadamente, con una estructura de tipo barcanas en forma de media luna, su cresta es perpendicular a la dirección del flujo de arena y sus cuernos apuntan en el sentido de la dirección del viento. La cresta es convexa y de menor pendiente que la parte cóncava. Estas geoformas se encuentran en el sector Parihuanco a 1.2 km al noreste del centro urbano de Cerro Azul y ocupa el 1 % de la superficie de la zona de estudio, Figura 27. Asimismo, a 500 m al noreste del sector Bellavista, se ha identificado la formación de nuevas dunas.

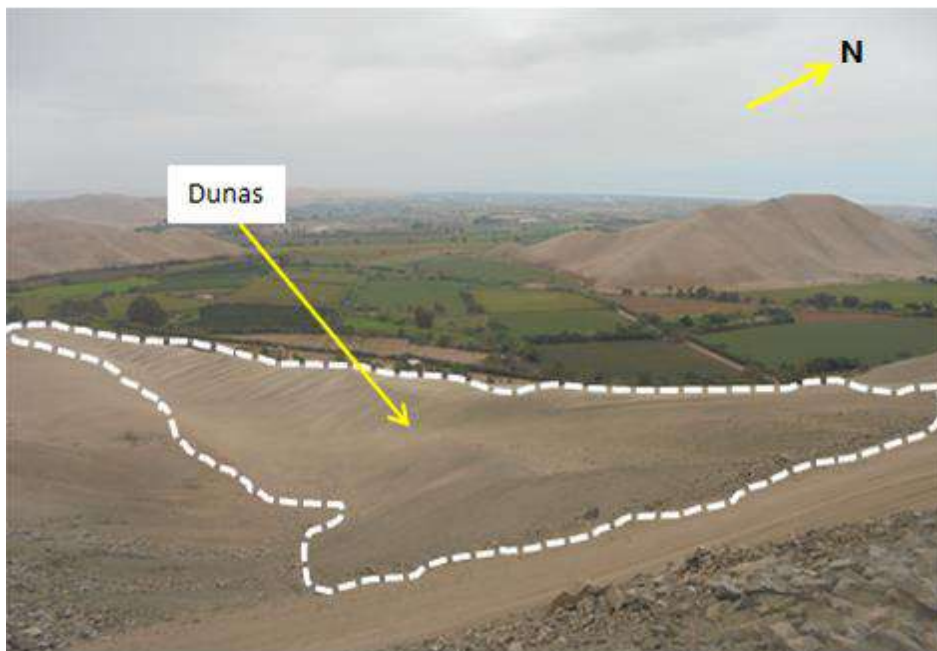


Figura 27: Dunas presentes en el sector de Parihuanco.

.- Playa: Superficie plana adyacente al litoral costero, cuyo relieve presenta pendientes menores a 2° . Por lo general, se caracteriza por tener forma alargada y/o recta. Está constituida por depósitos eólicos, fluviales y marinos. La unidad playa en la ciudad de Cerro Azul, se extiende a lo largo de 4 km aproximadamente, su ancho se incrementa de norte a sur, puesto que en esta dirección se produce la dinámica erosiva y de sedimentación. Esta unidad ocupa el 3 % de la superficie de la ciudad de Cerro Azul, Figura 28.



Figura 28: En Cerro Azul, la zona de playa se extiende a lo largo de 4 km (línea azul).

Además, se ha identificado que el proceso de oleaje en la ciudad de Cerro Azul está erosionando las zonas con afloramientos rocosos que constituyen la loma Camacho ubicada a 1 km al suroeste del centro urbano (Figura 29). Asimismo, y en la zona del balneario el oleaje ha producido daños en las infraestructuras del malecón, Figura 30.



Figura 29: Balneario Cerro Azul, obsérvese los escalones dañados por el oleaje..



Figura 30: La formación de un arco en el cerro Camacho es debido a la erosión marina (SO del área urbana de Cerro Azul).

9.1.1.3.- Origen marino

Los cambios en el nivel del mar se manifiestan a través del oleaje, proceso que se encarga de modelar los márgenes del litoral. Los materiales que conforman estos márgenes están sujetos a erosión y por ende, son desplazados por las mismas corrientes marinas, modificando el límite costero y formándose las bahías.

Bahía: Superficie plana, formada por la erosión marina en la costa, de forma cóncava o semicircular. Es decir, una concavidad en la línea costera debido al empuje del oleaje del mar hacia el continente como parte de un proceso estacionario. En la ciudad de Cerro Azul, esta geofroma se encuentra a lo largo de 1 km del litoral costero. Esta unidad ocupa el 3% de la superficie de la ciudad de Cerro Azul, Figura 31.



Figura 31: Bahía (línea blanca) en la ciudad de Cerro Azul formada por el ingreso del mar

9.2.- Geología

La geología es la ciencia que se encarga del estudio de la tierra teniendo en cuenta aspectos como: origen, estructura, composición, evolución, así como los distintos procesos internos y externos que se desarrollan en ella a través del tiempo. Para la comprensión de dichos procesos es necesario la interacción de la geología con otras disciplinas como:

Geología histórica: Se encarga del estudio de los distintos procesos por los que ha pasado el planeta Tierra, desde su origen hasta la actualidad, para ello se creó una división cronológica conocida como “escala del tiempo geológico” que se subdivide en: eras, períodos, edades, etc.

Geología estructural: Se encarga del estudio del comportamiento de la corteza terrestre ante la acción de los diversos esfuerzos tectónicos que generan diversidad de estructuras geológicas tales como: pliegues, fallas, estratificaciones, entre otros.

Además, existen otras disciplinas como la vulcanología, geomorfología, geodinámica y geotecnia, encargadas del estudio de las rocas para la extracción de depósitos de minerales, hidrocarburos, aguas subterráneas, ingeniería sísmica, entre

otros. En el presente estudio, se hace incidencia en el reconocimiento de las formaciones geológicas (litologías) y depósitos del cuaternario en la ciudad de Cerro Azul y alrededores.

9.2.1- Geología regional

Para describir las principales unidades geológicas, se tomó como base la información regional descrita por Salazar y Landa (1993) a escala 1/100000. Estos autores describen las unidades litológicas aflorantes en las inmediaciones de la zona de estudio, todas con edades entre el Mesozoico Inferior y Cuaternario Reciente. Estas unidades están conformadas por rocas volcánicas y sedimentarias, de las cuales se tiene como substrato rocoso a la Formación Pucusana del Cretáceo Inferior, constituida principalmente rocas sedimentarias e intercalaciones volcánicas del tipo andesita, cubierta por depósitos del Cuaternario (eólicos, aluviales y marinos). Además, existen cuerpos que instruyen a las formaciones antes descritas como son rocas intrusivas de la Superunidad Linga del Cretáceo Superior, constituidas por cuarzomonzonitas y cuarzomonzodioritas, Figura 32.



ERATEMA	SISTEMA	SERIE	UNIDADES LITOESTRATIGRÁFICAS	Rocas Intrusivas
CENOZOICO	CUATERNARIO	Holoceno	Dep. Eólicos Qh-e 	
			Dep. Aluviales Qh-al 	
			Dep. Marinos Qh-m 	
	NEOGÉNO	Plioceno		
		Mioceno		
MESOZOICO	CRETÁCICO	Superior	Fm. Pucusana Ki-pu 	Superunidad Linga Ks-lj/czmz,czmzdi 
Inferior				

Figura 32: Columna cronolitoestratigráfica de unidades aflorantes en la ciudad de Cerro Azul y alrededores.

9.2.2- Geología local

In situ, se procedió con el reconocimiento y cartografiado de las unidades litológicas aflorantes en la ciudad de Asia a escala 1:15,000, sobre un área de 17 km² aproximadamente (Figura 33). A continuación se describen las principales características de estas unidades estratigráficas.

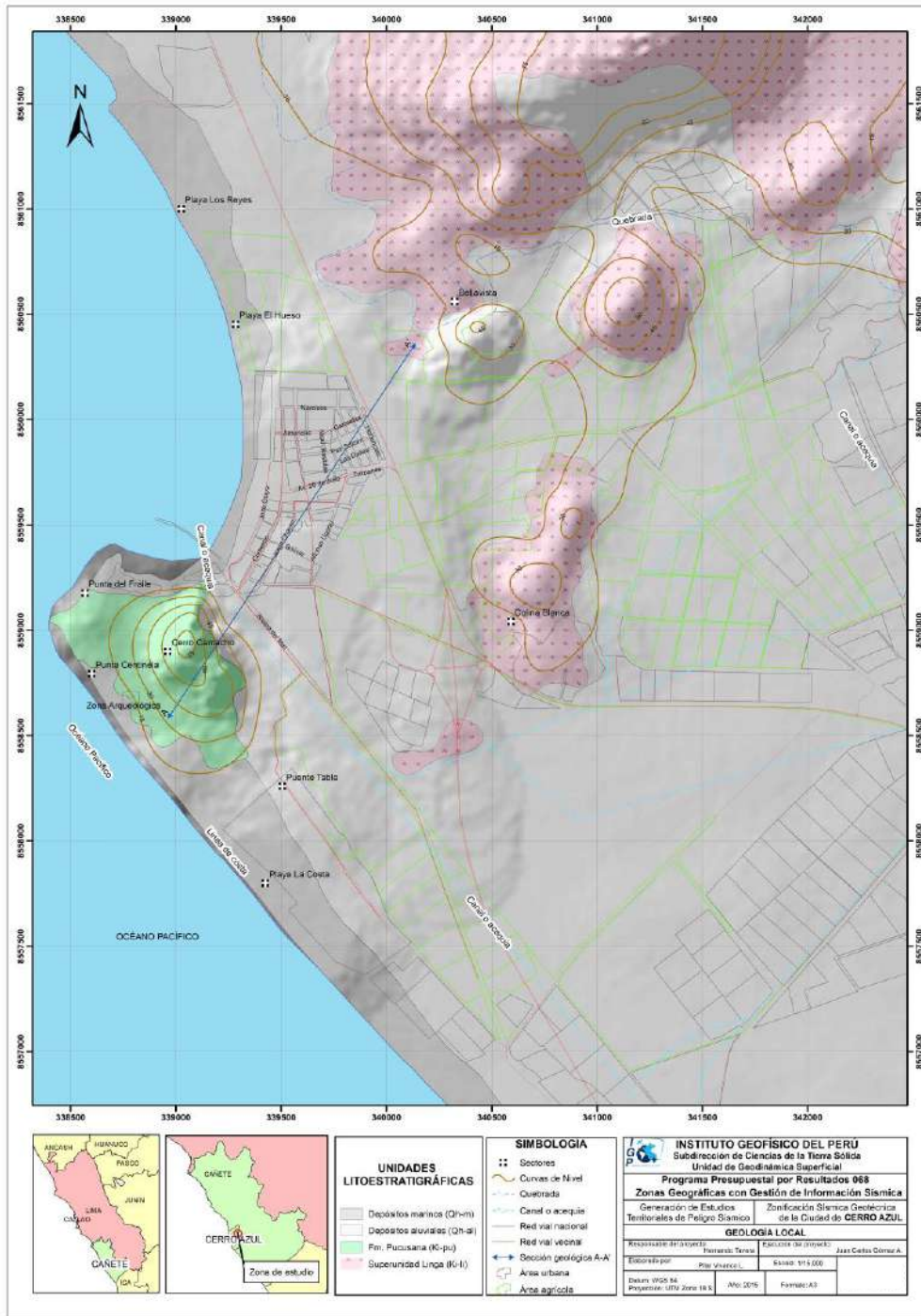


Figura 33: Mapa geológico local de la ciudad de Cerro Azul y alrededores

Formación Pucusana (Ki-pu): Constituida por una secuencia de rocas sedimentarias e intercalaciones volcánicas del tipo andesita. Afloran en el cerro Camacho, sector Puente Tabla, a 700 m. al sur de la municipalidad de Cerro Azul, Figura 34.



Figura 34: Afloramiento de rocas volcánicas de la formación Pucusana, Loma Camacho.

.- **Depósitos cuaternarios:** Suprayaciendo al substrato rocoso conformado por rocas volcánicas (andesitas), se encuentran los depósitos Cuaternarios de edad Holocena, principalmente de origen aluvial, eólico y marino. Las características de estos depósitos se describen a continuación:

Depósitos aluviales (Qh-al): Estos depósitos sobreyacen a la Formación Pucusana, están constituidos por gravas redondeadas, mayores a 2 “de diámetro y arenas de grano fino a medio, sobre estos depósitos se asienta el área urbana de la ciudad de Cerro Azul, Figura 35.

Depósitos eólicos (Qh-e): Constituidos por arenas de grano medio, transportados cuando el viento deja caer su carga de sedimento al disminuye su velocidad y energía disponible, permitiendo la acumulación de partículas. Otro factor que contribuye a su depositación es la presencia de una geoforma que impida su avance como estructuras rocosas. Estos depósitos cubren parte de las lomas presentes en el sector Parihuanca, extremo NE de la ciudad de Cerro Azul.



Figura 35: Depósito aluvial sobre el cual se asienta el área urbana de la ciudad de Cerro Azul.

Depósitos marinos (Qh-m): Estos depósitos están conformados por arenas finas presentes en la zona costera, desde el cerro Camacho hasta la playa El Hueso, sobre una longitud de 2.2 km aproximadamente, Figura 36.



Figura 36: Depósitos marino en la franja costera de la ciudad de Cerro Azul.

.- **Rocas Intrusivas:** Estas rocas tienen su origen en la solidificación de una mezcla fundida llamada magna que se encuentra en el interior de la corteza.

Superunidad Linga (ki-li/di): Constituida por rocas ígneas del tipo diorita. Éstas afloran en los sectores Bellavista a 400 m. al norte del centro urbano de Cerro Azul, así como, en el sector Colina, Blanca y Parihuanco, Figura 37.



Figura 37: Rocas intrusivas del tipo diorita de la unidad Superunidad Linga, sector Colina Blanca.

9.3.- Geodinámica

La geodinámica abarca el estudio de los procesos y cambios físicos que ocurren constantemente sobre la superficie de la Tierra. Estas transformaciones son posibles debido a la intervención de agentes internos y externos que crean, forman, degradan y modelan la superficie terrestre. Esta rama de la geología se subdivide en:

.- **Geodinámica interna:** El territorio peruano está sometido a una constante actividad sísmica, debido a la interacción de las placas Sudamericana y Nazca, escenario considerado como la primera fuente sismogénica en el Perú debido a la frecuencia de sismos y por dar origen a los eventos de mayor magnitud. La segunda fuente, la constituye la zona continental, cuya deformación ha dado origen a la formación de fallas de diversas longitudes con la consecuente ocurrencia de sismos de magnitudes menores (Cahill et al, 1992; Tavera et al, 2001). Históricamente, la

ocurrencia de sismos en la zona de estudio, se constituye como el principal detonante de eventos geodinámicos como los movimientos en masa, la caída de rocas y derrumbes.

*.- **Geodinámica externa:** La geodinámica externa estudia la acción de los procesos exógenos sobre la superficie de la Tierra. En tal sentido, las precipitaciones pluviales son las de mayor incidencia en la geodinámica del territorio, pues constituyen el principal factor detonante de los Movimientos en Masa (MM), como los deslizamientos, derrumbes y caída de rocas; los cuales a su vez afectan la seguridad física de los centros poblados donde ocurren este tipo de eventos.*

El evento geodinámico predominante en el distrito de Cerro Azul, son los movimientos de masa del tipo caída de rocas y sus características se describen a continuación (Figura38).

9.3.1.- Movimientos en masa

Son movimientos que por efecto de la gravedad, ladera abajo, trasladan laderas abajo, rocas, detritos o tierras (Cruden, 1991). Para proceder a la clasificación de los movimientos en masa en la ciudad de Asia y alrededores, se hace uso de las tablas propuestas por Varnes (1958, 1978) y Hutchinson (1968, 1988). Estas tablas tienen en cuenta el tipo de movimiento y el tipo de material. En cuanto al primero, se considera 5 clases: caídas, volcamientos, deslizamientos, flujos y propagación lateral. Dentro de los materiales se consideran: rocas y suelos, estos últimos subdivididos en detritos y tierras. El trabajo de campo realizado en la ciudad de Cerro Azul y alrededores, ha permitido identificar procesos de caída de rocas, siendo sus características las siguientes:

*.- **Caídas de rocas:** En este tipo de eventos, los clastos o fragmentos de rocas preexistentes se desprenden de una ladera, como resultado de procesos de erosión y meteorización, ya sea de origen natural o antrópico. En la ciudad de Cerro Azul y alrededores, estos movimientos en masa fueron identificados las laderas de la loma Colina Blanca ubica a 1 km en dirección este del área urbana de Cerro Azul, y que debido a sus pendientes de 35° afectan a la población. Asimismo, están presentes en la ladera de la loma Parihuanco ubicado a 2 km el NE del área urbana, además de ocurrir a 15 metros de la zona donde se*

encuentran los postes de alumbrado público. Estos fragmentos de rocas tienen diámetros de 5" (Figuras 39 y 40).

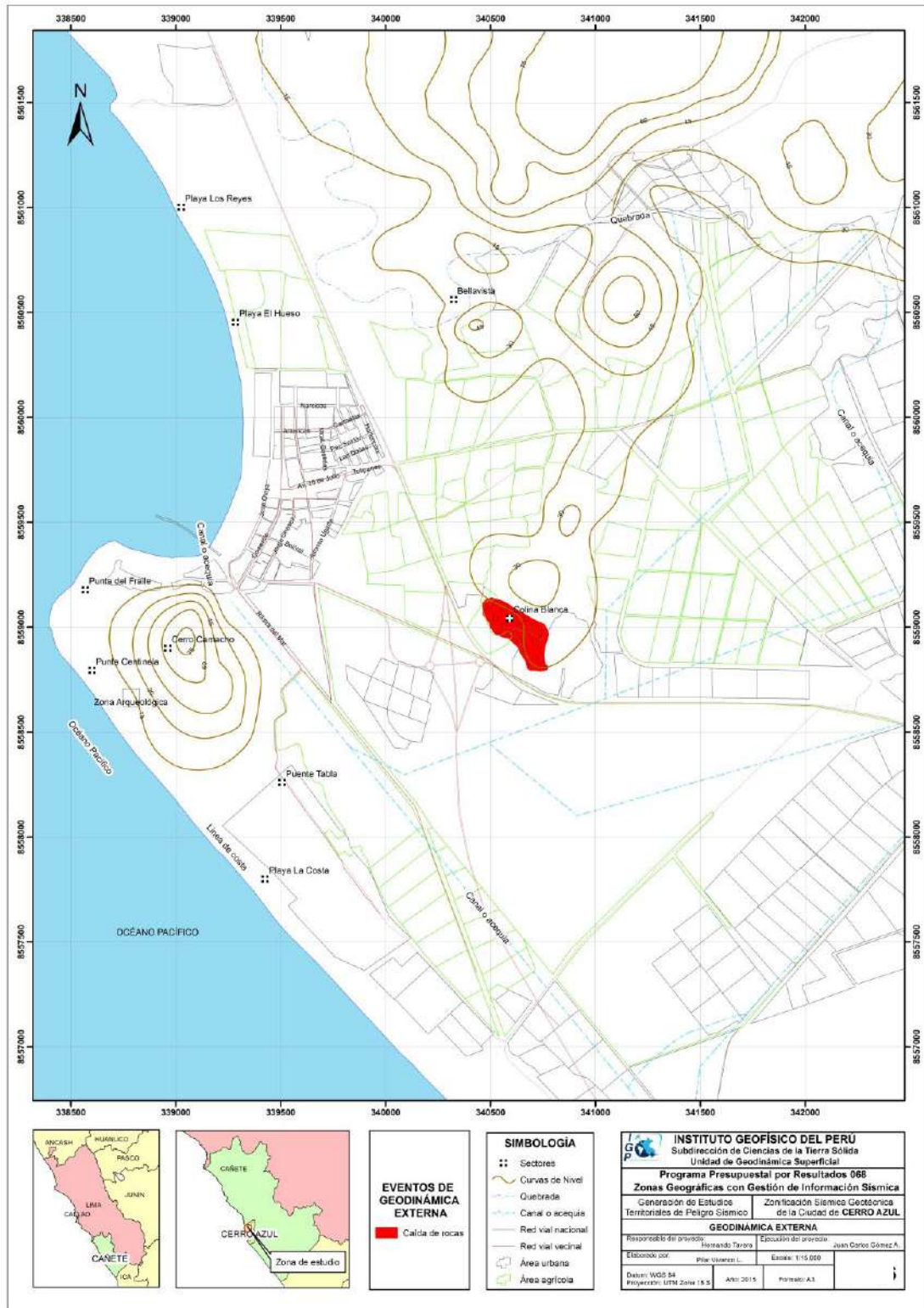


Figura 38: Mapa geodinámico local para la ciudad de Cerro Azul y alrededores



Figura 39: Caída de rocas en la ladera SO de la Loma Colina Blanca y sobre la cual se asiente la población



Figura 40: Caída de rocas en la loma Parihuanco

10.- GEOTÉCNIA

Los estudios geotécnicos tienen por finalidad analizar y cuantificar las características físicas de los suelos, siendo su comportamiento relevante al momento de utilizarlo como elemento de medida para el soporte de una estructura determinada (cimentaciones). Para el estudio de los suelos en la ciudad de Cerro Azul se recolectó información según las siguientes técnicas:

.- Exploraciones a cielo abierto (calicatas, Norma ASTM D420): En la ciudad de Asia se construyeron 6 calicatas (Tabla 1 y Figura 41) siendo la profundidad máxima de observación del orden de 3.0 metros y la mínima de 1.2 metros (ver Anexos). Las profundidades varían porque algunos suelos se encontró nivel freático superficial, lo que impidió seguir con la excavación.

Tabla 1: Coordenadas UTM para la identificación de las calicatas (NP= no presenta)

CALICATA	UTM ESTE (m)	UTM NORTE (m)	ELEVACIÓN (m.s.n.m.)	PROFUNDIDAD (m)	NIVEL FREÁTICO A (m)
C - 01	339505	8560042	20	1.20	1.20
C - 02	340740	8559566	22	2.80	N.P.
C - 03	339374	8558227	21	2.00	1.60
C - 04	340095	8560420	21	3.00	N.P.
C - 05	341597	8558818	30	3.00	N.P.
C - 06	339671	8559149	14	1.20	1.20

.- Densidad de suelo in situ (Norma ASTM D1556): En cada punto de exploración se realizó ensayos de campo aplicando el método del cono a fin de conocer la densidad y el contenido de humedad del suelo en condiciones naturales (ver Anexo). Esta información es necesaria para la preparación de las muestras de suelo al momento de realizar los ensayos de corte directo. En la Tabla xxx se presenta los resultados obtenidos en cada punto de observación, los mismos que sirven para identificar las condiciones naturales del terreno (compactación y humedad), información necesaria para desarrollar los ensayos de corte directo en las muestras de suelo en su estado inicial. Para la Calicata C-01 y C-03, no se

realizó el ensayo de densidad debido a que se identificó la presencia de suelos gravosos.

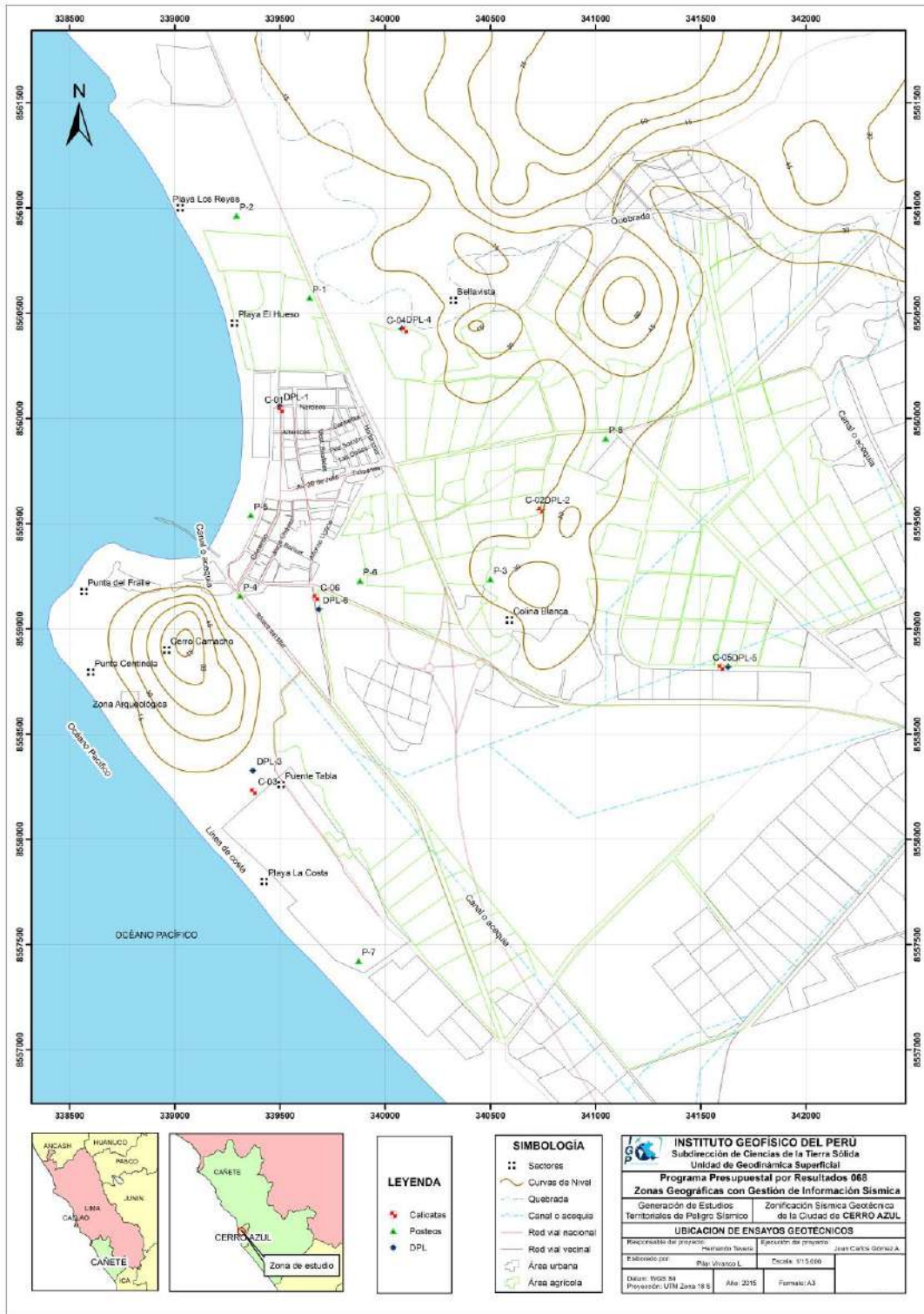


Figura 41: Mapa de ubicación de calicatas y posteos de suelos en la ciudad de Cerro Azul

Tabla 2: Valores de densidades de suelo in situ obtenidas para la ciudad de Cerro Azul

CALICATA	MUESTRA	PROFUNDIDAD (m)	DENSIDAD HÚMEDA (gr/cm ³)	DENSIDAD SECA (gr/cm ³)
C - 01	DC-CA - 01	N.P.	N.P.	N.P.
C - 02	DC-CA - 02	1.50	2.21	2.10
C - 03	DC-CA - 03	N.P.	N.P.	N.P.
C - 04	DC-CA - 04	3.00	2.22	2.45
C - 05	DC-CA - 05	3.00	1.72	1.43
C - 06	DC-CA - 06	1.00	1.43	1.00

- Exploración con posteadora manual (Norma ASTM D1452): A fin de completar la información geotécnica, se procedió a realizar 8 muestreos adicionales de suelo utilizando una posteadora manual (Tabla 3), siendo en este caso, la máxima profundidad de observación de 2.60 metros y la mínima del orden de 0.50 cm (ver Anexos), debido principalmente a que los suelos están constituidos por arenas con presencia de gravas. Estas exploraciones fueron distribuidas entre las calicatas, en lugares donde no existe información geotécnica a fin de tener mejor caracterización de los suelos en la ciudad de Cerro Azul.

Tabla 3: Posteos y clasificación SUCS en la ciudad de Cerro Azul

POSTEOS	UTM ESTE(m)	UTM NORTE(m)	ELEVACIÓN (m.s.n.m.)	PROFUNDIDAD (m)	TIPO DE SUELO	NIVEL FREÁTICO ENCONTRADO A
Post - 01	339642	8560573	17	2.60	SP	2.50
Post - 02	339294	8560963	14	1.60	SP	N.P.
Post - 03	340500	8559235	20	2.40	SP	N.P.
Post - 04	339312	8559157	19	1.60	SP	N.P.
Post - 05	339362	8559540	20	0.60	GP	N.P.
Post - 06	339882	8559228	17	2.20	SP	2.20
Post - 07	339875	8557422	15	0.50	GP	N.P.
Post - 08	341049	8559904	30	1.60	CL	N.P.

- Ensayo de penetración dinámica ligera (DPL, Norma DIN4094): Se procedió a estimar la resistencia del suelo al hincado del cono dinámico en 6 puntos dentro de la ciudad de Asia (Tabla 4). Estos ensayos se realizaron hasta una profundidad máxima de 2.50 metros y mínima de 0.5 metros debido a que los suelos son

granulares de origen aluvial (gravas y arenas mal graduadas) con ángulos de fricción de 39° y 41° en promedio (ver Anexos). Asimismo, se ha determinado que los suelos tipo arena mal graduada presentan valores de ángulo de fricción superiores a los 35° en promedio; por tanto, son de consistencia compacta a suelta; mientras que, los suelos tipo arena limosa, generalmente presentan ángulos de fricción menores a los 35° y consistencia suelta (inconsolidado).

Tabla 4: Coordenadas UTM para la ubicación y profundidad de los ensayos de penetración ligera

DPL	UTM ESTE(m)	UTM NORTE(m)	ELEVACIÓN (m.s.n.m.)	PROFUNDIDAD (m)	NÚMERO DE GOLPES	ϕ
DPL - 01	359500	8560058	20	0.70	47	40.3
DPL - 02	340739	8559568	22	2.20	45	39.7
DPL - 03	339372	8558326	21	0.50	50	41
DPL - 04	340081	8560426	21	2.10	45	39.7
DPL - 05	341602	8558819	30	2.50	45	39.7
DPL - 06	339686	8559093	14	1.20	45	39.7

Dónde: ϕ = Ángulo de fricción interna

10.1.- Clasificación de suelos SUCS

En base a la información geotécnica recopilada de las calicatas, posteos y de los resultados obtenidos de los ensayos granulométricos realizados en el laboratorio de la Universidad La Molina, se realiza la clasificación de suelos SUCS para la ciudad de Cerro Azul. Se ha identificado la existencia de 4 tipos de suelos cuyas características se describen a continuación (Figura 42 y Tabla 5):

***Suelos tipo GP:** Están conformados por gravas arenosas mal graduadas, siendo su contenido de humedad de 9.75 %. Se consideran como suelos semicompactos y no presenta plasticidad. Ocupan el 37 % de los suelos presentes en la ciudad de Cerro Azul, estando presentes en el sector Puente Tabla, calicata (C-.03). Presentan su nivel freático a 2.00 m de profundidad.*

***Suelos tipo GP-GM:** Están conformados por gravas arenolimosas, siendo su contenido de humedad de 18.03 %. Son suelos inconsolidados y no presentan plasticidad. Ocupan el 6 % de los suelos de la ciudad de Cerro azul. Se*

identificaron en la calicata (C-01), en la calle Narcisos, estando su nivel freático a 1.20 m. de profundidad.

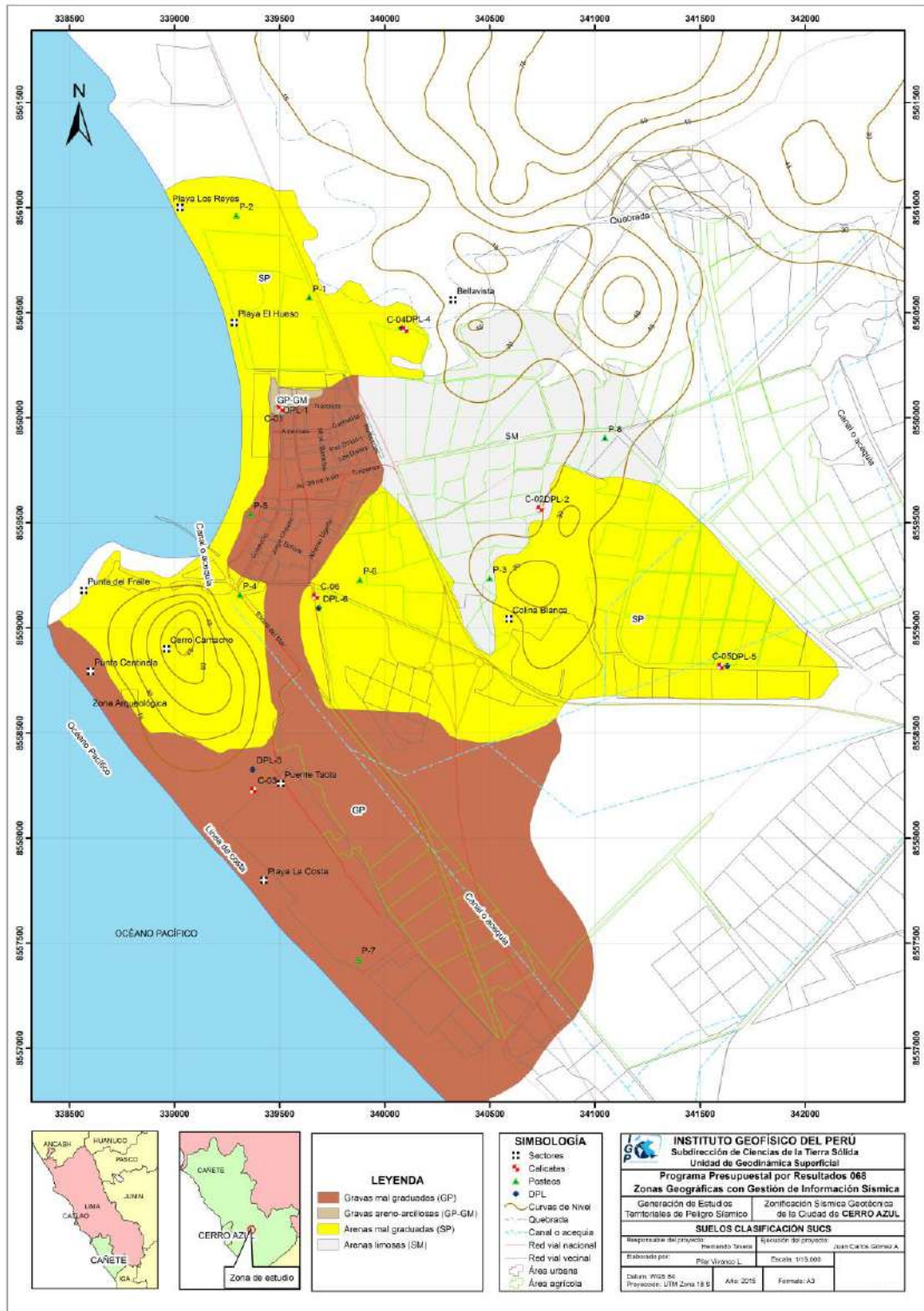


Figura 42: Mapa de clasificación SUCS de suelos en la ciudad de Cerro Azul y alrededores

Tabla 5: Valores obtenidos en la clasificación de suelos en la ciudad de Cerro Azu. I (N.P. = no presenta)

CALICATA	PROFUNDIDAD (m)	NIVEL FREÁTICO (m)	GRAVAS % (>4.76 mm)	ARENAS % (>0.074 mm, <4.76 mm)	FINOS % (<0.074 mm)	LÍMITE LÍQUIDO (%)	LÍMITE PLÁSTICO (%)	ÍNDICE PLÁSTICO	CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	CLASIFICACIÓN SUCS	DENOMINACIÓN
CA - 01	1.20	1.20	44.31	28.85	26.84	N.P.	N.P.	N.P.	18.03	GP-GM	Grava arenolimsa
CA- 02	2.80	N.P.	N.P.	96.96	3.04	N.P.	N.P.	N.P.	5.23	SM	Arena con finos
CA - 03	2.00	1.60	83.26	16.26	0.48	N.P.	N.P.	N.P.	9.75	GP	Grava arenosa, con limo
CA - 04	3.00	N.P.	0.45	98.53	1.03	N.P.	N.P.	N.P.	3.13	SP	Arena mal graduada, con gravas y limos
CA - 05	3.00	N.P.	0.66	98.88	0.46	N.P.	N.P.	N.P.	79.43	SP	Arena mal graduada, con gravas y limos
CA - 06	1.20	1.20	0.23	99.58	0.19	N.P.	N.P.	N.P.	75.65	SP	Arena mal graduada, con gravas y limos

*.- **Suelos tipo SP:** Están conformados por gravas arenosas mal graduadas, siendo su contenido de humedad de 3.13 % a 75.65 %, Se consideran como suelos semicompactos y no presentan plasticidad (debido a la escasa presencia de material fino). Ocupan el 44 % de los suelos de la ciudad de Cerro Azul y han sido identificados en los sectores Bellavista (calicata C-04), Colina Blanca (calicata C-05), así como, en la calle Rivera del Mar en el centro urbano. En la calicata (C-06) se encontró el nivel freático a 1.20 m. de profundidad.*

*.- **Suelos tipo SM:** Están conformados por arenas limosas, siendo su contenido de humedad de 5.23 % y por lo cual, se considera que su capacidad de retención (permeabilidad) es moderada. Son suelos semicompactos y no presentan plasticidad. Estos suelos representan el 13 % del área de la ciudad y han sido identificados en el extremo NO del sector Colina Blanca (calicata C-02). No presenta nivel freático.*

10.2.- Potencial de licuación de suelos

La licuación es un fenómeno por el cual un suelo completamente saturado, con arenas sin cohesión, generalmente limpias, que pueden incluir algo de gravas puede ser licuefactado durante el movimiento sísmico (Rodríguez, 1997). Este proceso se presenta generalmente en materiales de granulometría uniforme, sueltos y totales o parcialmente saturados. Estos suelos durante un movimiento sísmico pierden su capacidad de resistencia y fluye hasta encontrar una configuración compatible con las cargas sísmicas.

El nivel freático superficial en un suelo, incrementa la probabilidad de ocurrencia de licuación; pues a menor distancia de la superficie, incide el mayor grado de licuación del suelo durante un evento sísmico. En la distribución de suelos, la zona de playa, es probable este fenómeno por la presencia del nivel freático a menos de 3.00 m. de profundidad. En la ciudad de Cerro Azul se identificó la presencia de zonas con potencial de licuación de suelos, estando el nivel freático a 1.20 m por debajo del terreno. Este nivel es variable según la estación del año y asciende en periodos lluviosos. Para determinar el potencial de licuación de suelos se utilizó el método de Youd y Seed-Idris (2001), el cual determina el factor de seguridad ante el potencial de licuación de suelos, tomando como datos los resultados del laboratorio y la siguiente relación:

$$FL = \frac{(\tau_1/\sigma_s)}{(\tau_d/\sigma_s)}$$

Donde,

Si $FL > 1$ No se produciría licuación de suelos

Si $FL < 1$ Se produciría licuación de suelos

Por otro lado, para el cálculo del potencial de licuación es necesario estimar el esfuerzo total y efectivo en profundidad y para ello se utilizaron los datos de peso específico obtenidos del laboratorio. El esfuerzo total en profundidad está dado por:

$$\sigma_s = \gamma_1 * h_o + \gamma_2 * h$$

.y el esfuerzo efectivo total en profundidad por:

$$\sigma'_s = \gamma_1 * h_o + (\gamma_2 - 1) * h$$

Dónde:

El peso específico seco = γ_1 (kg/cm²)

El peso específico saturado = γ_2 (kg/cm²)

.h = profundidad sobre el nivel freático

.h_o = profundidad del nivel freático

Asimismo, el factor de corrección por profundidad viene dado por:

rd = 0.98, a 10 m. de profundidad.

rd = 1, en superficie.

Si rd está entre 0 y 10 m. = $rd = (1 - 0.015h_o)$

El esfuerzo del corte producido por sismo = $\frac{\tau_{av}}{\sigma}$

El esfuerzo de corte = $(\frac{\tau_d}{\sigma_s})$, se obtiene del análisis de los parámetros N1 con la siguiente relación:

$$\frac{\tau_d}{\sigma'_s} = 0.65 * \frac{a_{m\acute{a}x}}{g} * \frac{\sigma_s}{\sigma'_s} * rd$$

Donde, la aceleración máxima en superficie = $a_{m\acute{a}x}$

.y la aceleración máxima de la gravedad = g

Para la ciudad de Cerro Azul y alrededores, en la Tabla 6 se resumen los valores obtenidos para el potencial de licuación de suelos. Se debe considerar que el Esfuerzo cortante resistente = $\frac{\tau_i}{\sigma_s}$, se obtiene para $M=7.5$ y para suelos con distintos contenidos de finos, $N1$ = valor de N corregido a una sobrecarga de 1 Kg/cm^2 y un 60 % de eficiencia y en este caso, se utilizaron los datos obtenidos con la técnica del DPL.

Tabla 6: Resumen de datos para el cálculo de potencial licuación de suelos

Calicatas	σ_s (kg/cm2)	σ'_s (kg/cm2)	rd	$\tau_i/\tau \sigma'_s$	NÚMERO DE GOLPES	CN	N1	$(\tau_i/\tau \sigma'_s) r$ M=7.5
C-06	0.1915	0.1913	0.98	0.11	34	1.7	33.75	0.3

Finalmente, se obtiene los siguientes valores:

$$FL = \frac{0.1}{0.33} = 0.333$$

Según estos resultados, a la ocurrencia de sismos es posible que en la ciudad de Cerro Azul se desarrollen procesos de licuación de suelos (Youd, 2001).

10.3.- Ensayo de corte directo (Norma ASTM D3080)

La finalidad de este ensayo es determinar la resistencia al esfuerzo corte de una muestra de suelo, sometida a fatigas y/o deformaciones (esfuerzos verticales y horizontales) que simulen la que existe o existiría en el terreno como producto de la aplicación de una carga. Esta resistencia a la cortante en el suelo se debe a dos componentes: la cohesión (relacionado comportamiento plástico que presentan las partículas finas de una muestra) y el ángulo de fricción interna (rozamiento que

existe en las partículas granulares). Para conocer esta resistencia en laboratorio se usa el equipo de corte directo, siendo el más típico una caja de sección cuadrada o circular dividida horizontalmente en dos mitades. Dentro de ella se coloca la muestra de suelo con piedras porosas en ambos extremos, se aplica una carga vertical de confinamiento (P_v) y luego una carga horizontal (P_h) creciente que origina el desplazamiento de la mitad móvil de la caja originando el corte de la muestra.

El resultado del análisis de seis (6) muestras extraídas de campo se muestran en la Tabla 7. Los resultados obtenidos muestran que los suelos en el área urbana de Cerro Azul presentan cohesión; mientras que, los valores para los ángulos de fricción interna se encuentran entre los 26° y 34° , característico de arenas sueltas mal graduadas con contenido de gravas.

Tabla 7: Resultados del ensayo de corte directo

MUESTRA	ÁNGULO DE FRICCIÓN INTERNA DEL SUELO (ϕ)	COHESIÓN APARENTE DEL SUELO (T_n/m^2)	DENSIDAD NATURAL (gr/cm^3)
C-01	33.50	0.00	N.P.
C-02	26.80	0.10	N.P.
C-03	33.57	0.00	1.98
C-04	27.20	0.00	N.P.
C-05	26.80	0.10	N.P.
C-06	26.80	0.10	N.P.

10.4.- Capacidad de carga admisible

Los resultados obtenidos de los ensayos de corte directo (ángulo de fricción y la cohesión), han permitido calcular con la ayuda de fórmulas empíricas la capacidad de carga última de los suelos (mayor presión unitaria que el suelo puede resistir sin llegar al estado plástico). En base a esta última se obtiene la capacidad de carga admisible que resulta al ser multiplicado por un factor de seguridad, cuyo valor es de $1/3$, de acuerdo a la norma técnica peruana para el diseño de cimentaciones. Para la ciudad de Cerro Azul y alrededores, la capacidad de carga fue calculado para una profundidad de cimentación de 1.20 m y ancho mínimo de cimentación de 1.00 m. Los resultados obtenidos para los seis puntos analizados se presentan en la Tabla 8.

Tabla 8: Capacidad de carga admisible en la ciudad de Cerro Azul

MUESTRA	CAPACIDAD DE CARGA ULTIMA (Tn/m ²)	CAPACIDAD DE CARGA ADMISIBLE (Kg/cm ²)
CA-01	73.10	1.90
CA-02	38.28	1.28
CA-03	76.13	1.90
CA-04	39.92	1.33
CA-05	38.25	1.28
CA-06	38.27	1.29

Considerando la clasificación de la Tabla 9, se ha determinado que gran parte del área urbana de la ciudad de Cerro Azul se asienta sobre suelos con la siguiente capacidad de carga admisible (Figura 43):

Tabla 9: Rangos de capacidad de carga admisible

CAPACIDAD DE CARGA ADMISIBLE Kg/cm ²	DENOMINACIÓN
<1.0	Muy Baja
1.0 – 2.0	Baja
2.0 – 3.0	Media
>3.0	Alta

- Capacidad de carga admisible baja: Comprende rangos de capacidad de carga admisible entre 1.00 - 2.00 kg/cm² y se encuentran representados por suelos compuestos por arenas limosas (SM) y gravas mal graduadas (GP), con grado de compactación bajo.

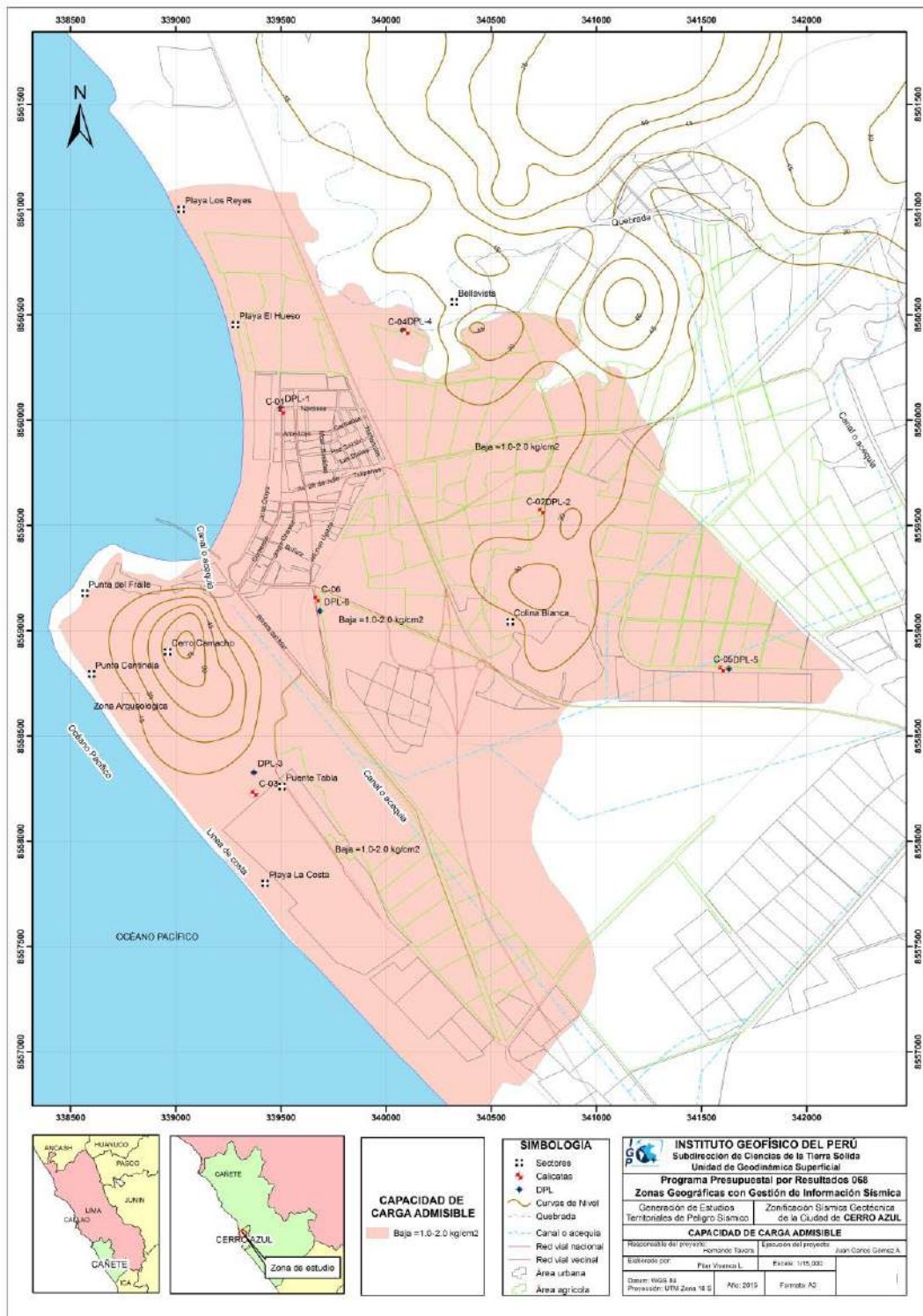


Figura 43: Mapa de capacidad de carga admisible en la ciudad de Cerro Azul y alrededores

11.- SÍSMICA Y GEOFÍSICA

En este estudio se ha realizado la aplicación de los siguientes métodos sísmicos y geofísicos: razones espectrales (H/V), arreglos lineales (MASW) y tomografía eléctrica, todos tienen como objetivo principal conocer las propiedades físicas del subsuelo (periodos dominantes, velocidades sísmicas, resistividades del subsuelo, etc.) a efectos de lograr su caracterización geofísica. A continuación, se describe el desarrollo de estos métodos y los principales resultados obtenidos para la ciudad de Cerro Azul y alrededores.

11.1.- Estudio sísmico con la técnica H/V

Para la aplicación de esta técnica se procedió, sobre el mapa catastral de la ciudad de Cerro Azul y alrededores a definir la distribución y el número de puntos para el registro de vibraciones ambientales teniendo en cuenta la información geológica y geomorfológica de la zona de estudio. En la Figura 44 se muestra la distribución espacial de los 110 puntos de registro de vibración ambiental obtenidos en campo, cada uno con una duración de 15 minutos, lo cual permite disponer de buena cantidad de información para su posterior análisis.

Esta información permite obtener espectros de Fourier para las tres componentes de registro y a partir de la razón de estos (componentes horizontales / componente vertical), conocer las frecuencias predominantes y/o periodos dominantes de vibración natural del suelo y en algunos casos, la amplificación sísmica relativa. En la Figura 45 se muestra, como ejemplo el procedimiento seguido para el punto AZ-023. En el extremo superior de la figura, se muestra el registro de vibración ambiental para 15 minutos analizado con ventanas de 20 segundos; en el extremo inferior izquierdo, la curva promedio de H/V con su respectiva desviación estándar, resaltando en este caso, las frecuencias predominantes a 1.89 Hz con amplificaciones relativas de hasta 4 veces con respecto al nivel de referencia. Este procedimiento de análisis se aplica al total de la información obtenida en campo.



Figura 44: Mapa de la ciudad de Cerro Azul y alrededores: distribución de puntos de registro de vibración ambiental

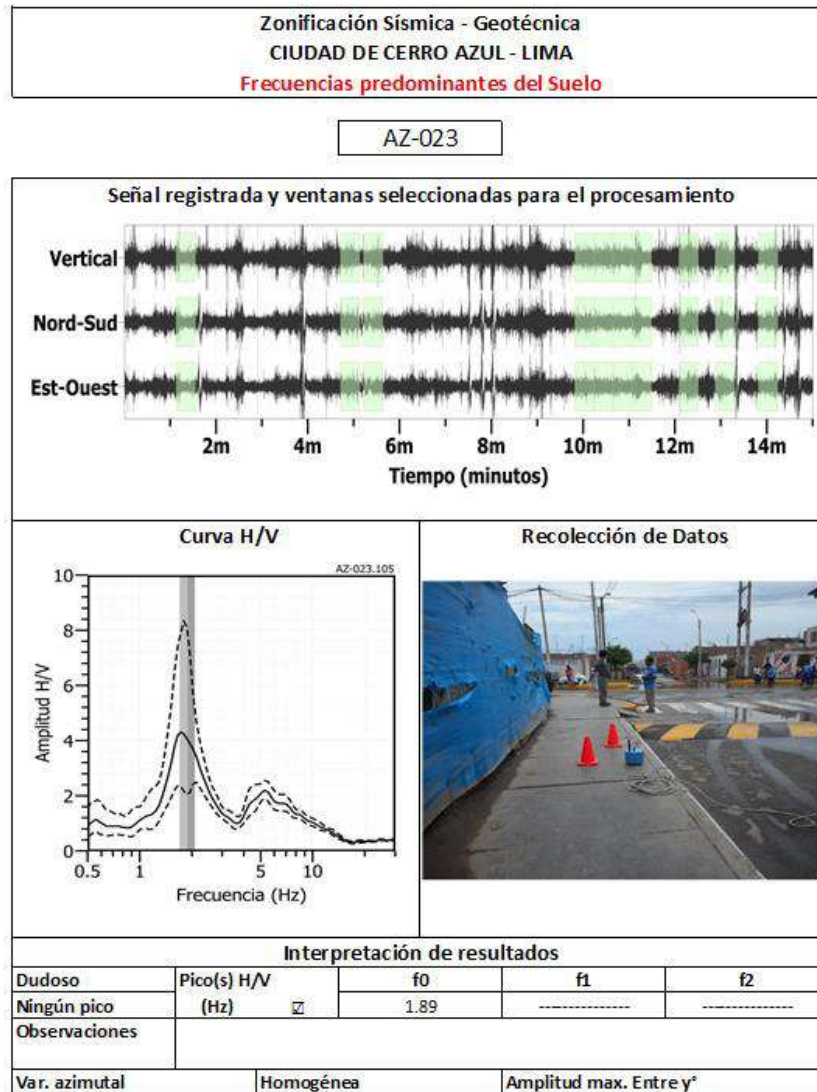


Figura 45: Ejemplo de la ficha H/V para el punto AZ-023 en la cual se recopila la información registrada y analizada. Arriba, señal registrada; Medio, razón espectral (H/V) en línea gruesa y su desviación estándar en línea discontinua. Abajo: resultados.

- Distribución de frecuencias predominantes: A partir de los valores extraídos de las razones espectrales H/V, se obtiene mapas con la distribución espacial de los valores de frecuencias predominantes. Los resultados muestran valores similares para frecuencias predominantes que se concentran en diversas áreas de la ciudad, lo cual sugiere que el subsuelo es heterogéneo y por ello, requiere de un análisis detallado para comprender su comportamiento dinámico.

En general, para el análisis de la información se debe considerar los siguientes aspectos: 1) Las frecuencias predominantes menores a 1 Hz corresponden a vibraciones generadas por el oleaje del mar, y/o cambios meteorológicos (periodos

muy largos), 2) Las bajas frecuencias o periodos largos son debidas a la presencia de depósitos profundos y 3) Las frecuencias altas o periodos cortos son debidos a depósitos superficiales blandos y de poco espesor (Bernal, 2006).

La información obtenida para las razones espectrales H/V, permite considerar para su análisis dos rangos de frecuencia: **F₀ (F<2.0Hz)** y **F₁ (F≥ 2.0 Hz)** en razón que en algunos puntos de medición hay hasta dos picos de frecuencias con diferentes amplificaciones. A continuación, se describe y analiza la distribución espacial de las frecuencias predominantes identificadas en la ciudad de Cerro Azul.

***.- Frecuencias predominantes F₀ (F<2.0Hz):** Estas frecuencias se presentan en el 85% de los puntos donde se recolectó información, distribuyéndose de manera uniforme sobre el área céntrica de la ciudad de Cerro Azul y sobre la Urb. El Sol, ubicada al Sur del Cerro Camacho. Los rangos de frecuencia fluctúan entre 1.0 y 2.0 Hz (Figura 46).*

En la Figura 47, se presenta ejemplos de razones espectrales obtenidas para los puntos AZ-043, AZ-044 y AZ-056, ubicados en la zona céntrica de la ciudad. El primero ubicado en la Plaza de Armas y los otros, hacia los extremos Este y Oeste, en todos los casos sobresalen frecuencias próximas a 1.5 Hz con amplificaciones máximas relativas de hasta 7.5 veces, evidenciando la gran flexibilidad de los suelos en este rango de frecuencia. Asimismo, en los puntos AZ-023, AZ-033 y AZ-049, ubicados hacia el extremo Norte de la Plaza de Armas, las curvas muestran variaciones de 1.5 a 2.4 Hz, excepto en el primer punto en donde sobresalen dos picos a 1.8 Hz y a 5.1 Hz con amplificaciones máximas relativas menores a 4.5 veces, lo cual evidencia la presencia de suelos menos flexibles en este sector del área céntrica de la ciudad.

En los puntos AZ-098, AZ-103 y AZ-110, ubicados en la Urb. El Sol (sector de expansión de Cerro Azul), sobresalen picos a 1.7, 1.9 y 1.4 Hz respectivamente, con amplificaciones relativas de 7.8, 9.0 y 9.7 veces, lo cual evidencian la presencia de suelos con alta sensibilidad en este rango de frecuencias.

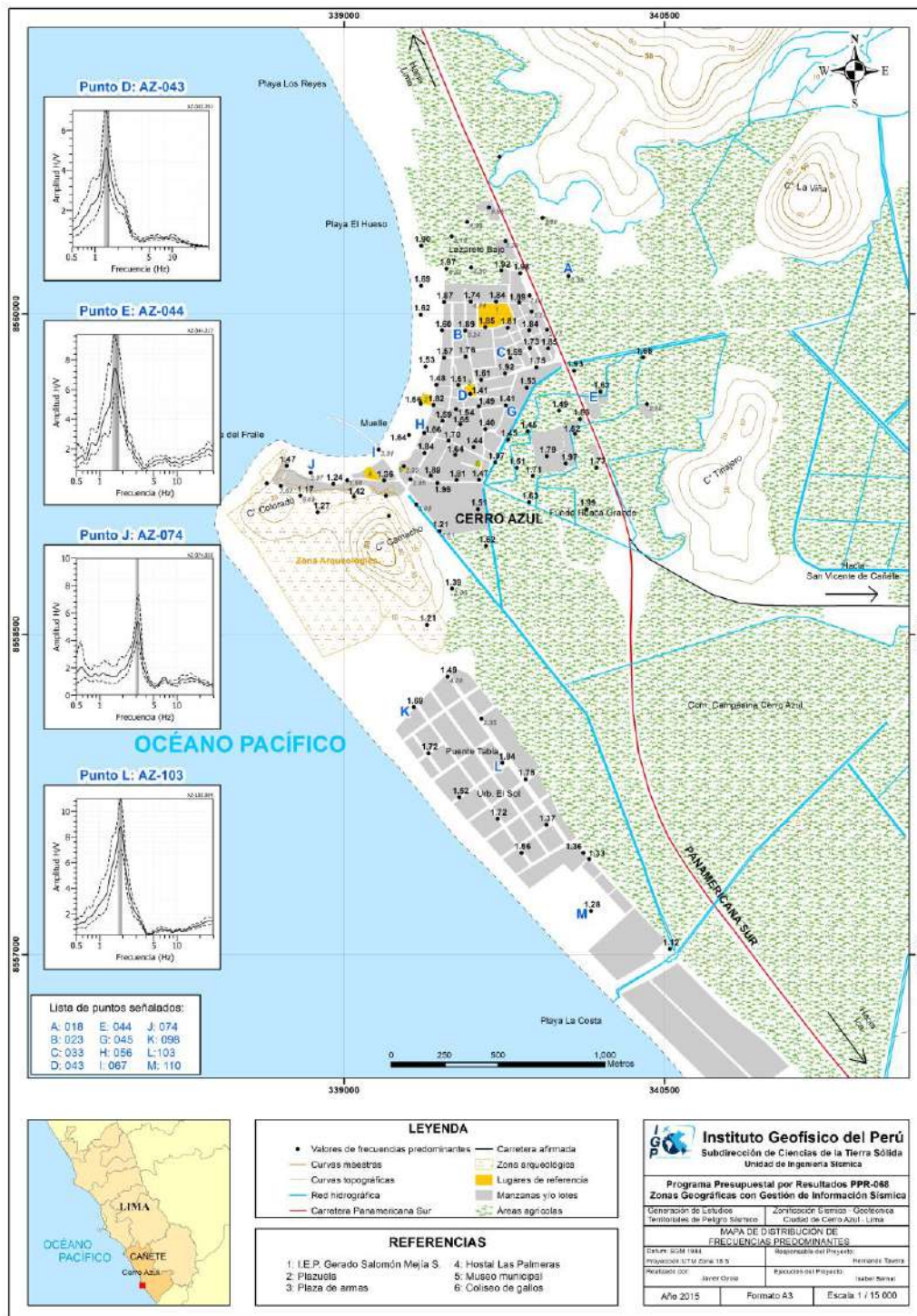
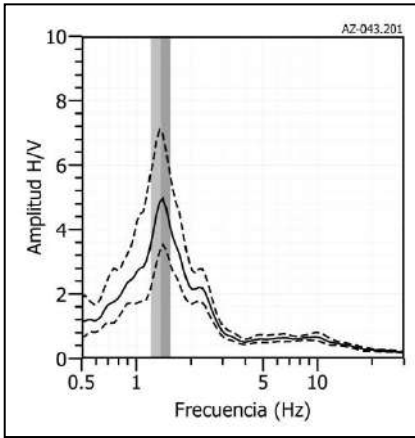
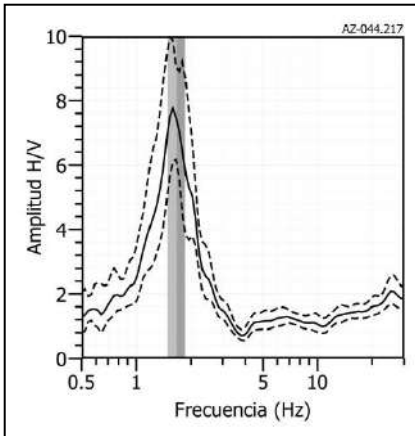


Figura 46: Mapa del área de estudio y distribución espacial de las frecuencias predominantes F_0 ($F < 2.0\text{Hz}$) y F_1 ($F \geq 2.0\text{Hz}$), este último se indica con números en gris.

AZ - 043



AZ - 044



AZ - 056

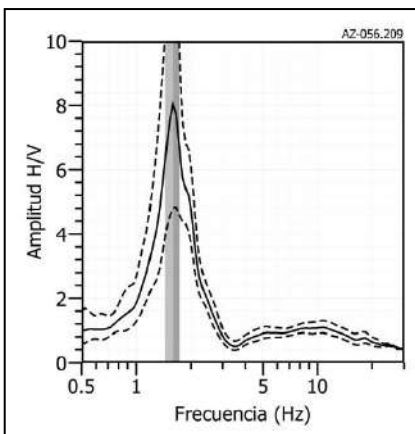
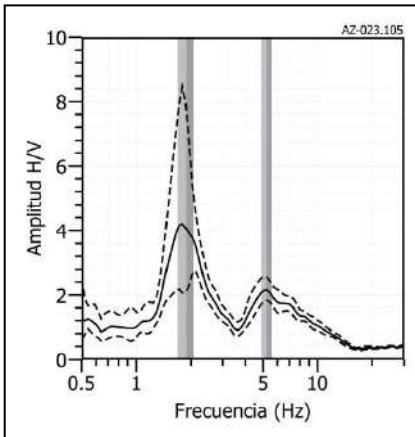
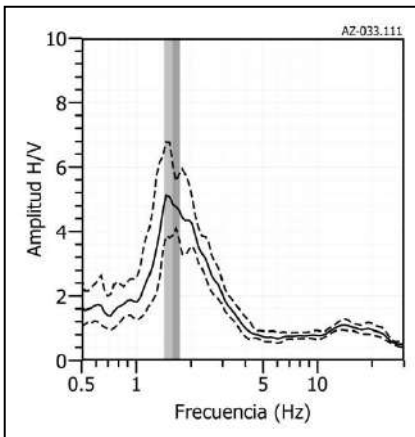


Figura 47: Ejemplos de razones espectrales (H/V) en el rango F_0 ($F < 2.0$ Hz). Para los puntos AZ-043, AZ-044 y AZ-056. El primero ubicado en la plaza de armas de la ciudad, los siguientes en el extremo Este y Oeste del centro de la ciudad. Las líneas continuas representan la razón espectral y las discontinuas su desviación estándar. Las barras grises, definen la frecuencia predominante.

AZ - 023



AZ - 033



AZ - 049

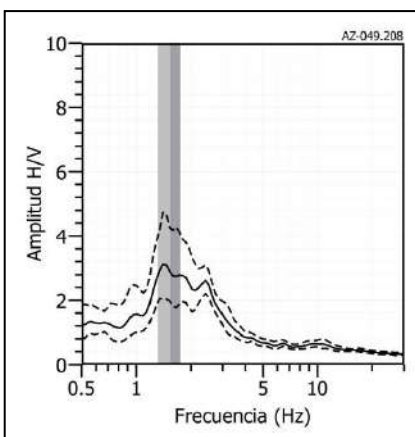
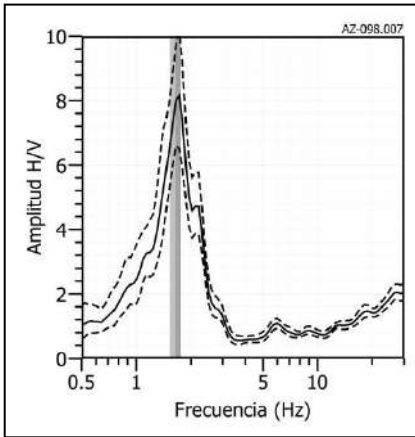
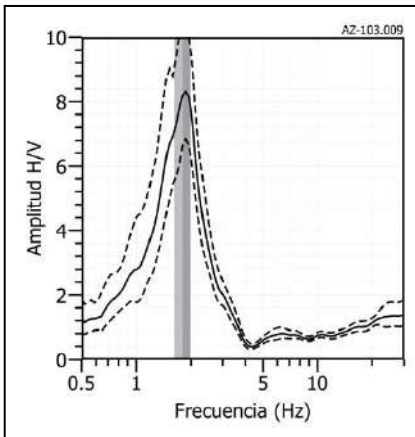


Figura 47: ... Continuación.../ Ejemplos de razones espectrales (H/V) en el rango F_0 ($F < 2.0\text{Hz}$). Para los puntos AZ-023, AZ-033 y AZ-049, ubicados hacia el extremo Norte de la Plaza de Armas. Las líneas continuas representan la razón espectral y las discontinuas su desviación estándar. Las barras grises, definen la frecuencia predominante.

AZ - 098



AZ - 103



AZ - 110

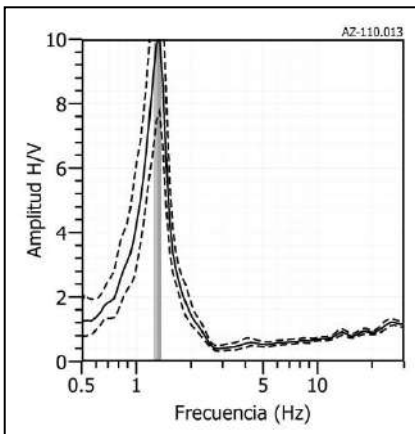


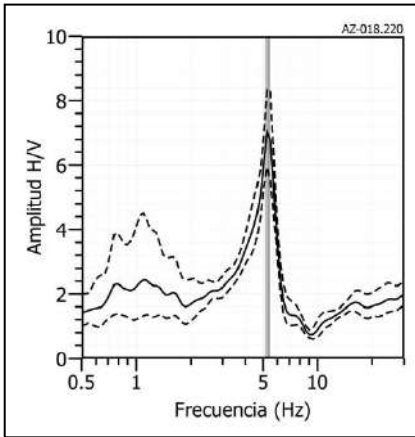
Figura 47: ... Continuación.../ Ejemplos de razones espectrales (H/V) en el rango F_0 ($F < 2.0\text{Hz}$). Para los puntos AZ-098, AZ-103 y AZ-110, ubicados en la Urb. El Sol (sector de expansión de Cerro Azul). Las líneas continuas representan la razón espectral y las discontinuas su desviación estándar. Las barras grises, definen la frecuencia predominante.

.- Frecuencias predominantes F1 ($F \geq 2.0$ Hz): Estas frecuencias se presentan en el 15% de los puntos donde se recolectó información, distribuyéndose principalmente en el extremo NE de la ciudad, próximos al Cerro Colorado y Camacho. De manera anómala, estas frecuencias con valores que varían entre 2.4 y 3.3 Hz, se distribuyen sobre una línea paralela al canal de agua que llega al Muelle de Cerro Azul (Figura 46).

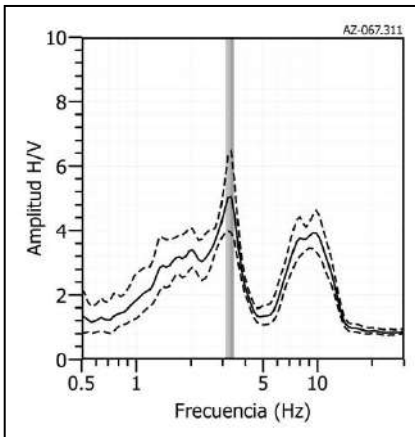
En la Figura 48, se muestra ejemplos de razones espectrales obtenidas para los puntos AZ-018, AZ-067 y AZ-074, ubicados el primero sobre un terreno de cultivo ubicado en el extremo NE de la ciudad y los otros dos, en la zona de playa (el punto AZ-067 próximo al Muelle y el punto AZ-074 entre la playa y el Cerro Colorado), donde sobresalen frecuencias a 5.1, 3.2 y 3.1 Hz con amplificaciones de 7, 5.2 y 5.4 respectivamente. En el punto AZ-067, sobresale un segundo pico a 10 Hz con amplificaciones de 3.8 veces asociado a la poca consistencia del subsuelo superficial.

De manera general, los suelos de la ciudad de Cerro Azul presentan, en su mayoría, amplificaciones máximas relativas altas, alcanzando valores de al menos 9.5 veces para el rango de frecuencias de 1.0 a 2.0 Hz, lo cual evidencia la presencia de suelos poco consistentes. Por otro lado, próximos a los cerros, las frecuencias presentan valores mayores (de 3.0 a 7.0 Hz), pero con amplificaciones menores e iguales a 5 veces.

AZ - 018



AZ - 067



AZ - 074

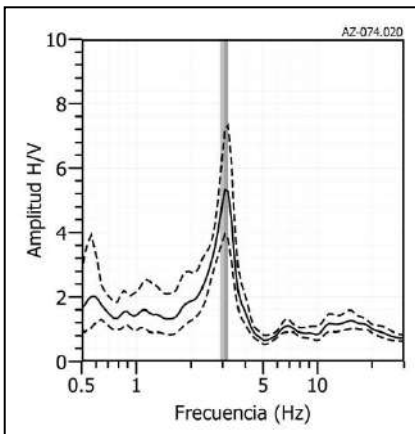


Figura 48: ... Continuación.../ Ejemplos de razones espectrales (H/V) en el rango F1 ($F \geq 2.0\text{Hz}$). Para los puntos AZ-018, AZ-067 y AZ-074, ubicados el primero en el extremo NE de la ciudad y los otros dos en zona de playa (el punto AZ-067 próximo al Muelle y el punto AZ-074 entre la playa y el Cerro Colorado). Las líneas continuas representan la razón espectral y las discontinuas su desviación estándar. Las barras grises, definen la frecuencia predominante.

11.2.- Estudios sísmicos con la técnica de arreglos sísmicos

La técnica MASW (Multichannel Análisis of Surface Waves) permite conocer la velocidad de propagación de las ondas sísmicas en el subsuelo a partir del análisis de la dispersión de ondas superficiales registradas por arreglos lineales de estaciones sísmicas. Como resultado de la inversión de la curva de dispersión, se obtiene el perfil de velocidades para las ondas de corte (V_s) en el punto central de cada arreglo.

Para el registro de la información se ha utilizado un equipo de refracción sísmica que consta de un registrador multipropósito, modelo GEODE (24-canales), geófonos de 4.5 Hz y registros a una resolución de 24 bits con un rango dinámico mayor a 110 dB. Como fuente de impacto y/o energía para generar las ondas sísmicas, se utilizó un martillo de 20 lbs. Los parámetros de registro, tales como la geometría del tendido, espaciamiento entre geófonos (entre 3 y 6 metros) y el punto de impacto del martillo, fue variable ya que dependió de la geomorfología de la zona de estudio. La frecuencia de muestreo fue de 4000 Hz con un pre-trigger de -0.1s y una longitud de registro de 2 segundos. Para eliminar el registro de ruido de fondo se realizaron entre 6 y 12 golpes en cada punto de disparo, permitiendo el estaqueo temporal de los datos y así, aumentar la coherencia en los resultados.

En la Figura 49, se presenta el mapa de la ciudad de Cerro Azul con la distribución espacial de once líneas de refracción sísmica codificadas como: LS01-AZ., LS6-AZ, y en la Tabla 10 se presentan las coordenadas de cada línea. En la Figura 50, se muestra imágenes de algunas observaciones de campo.

Las curvas de dispersión de ondas obtenidas para cada tendido y número de impactos, fueron promediadas y luego invertidas a fin de obtener perfiles de velocidad para puntos específicos del tendido. Para el análisis de los resultados obtenidos en este estudio se considera la clasificación que la Norma E.030 establece para cada tipo de suelo; sin embargo, para una mejor clasificación de los suelos, se ha visto por conveniente agregar una subdivisión para los "suelos duros" a fin de considerar dos clasificaciones adicionales, "suelos moderadamente duros" y "suelos duros", según el siguiente detalle:

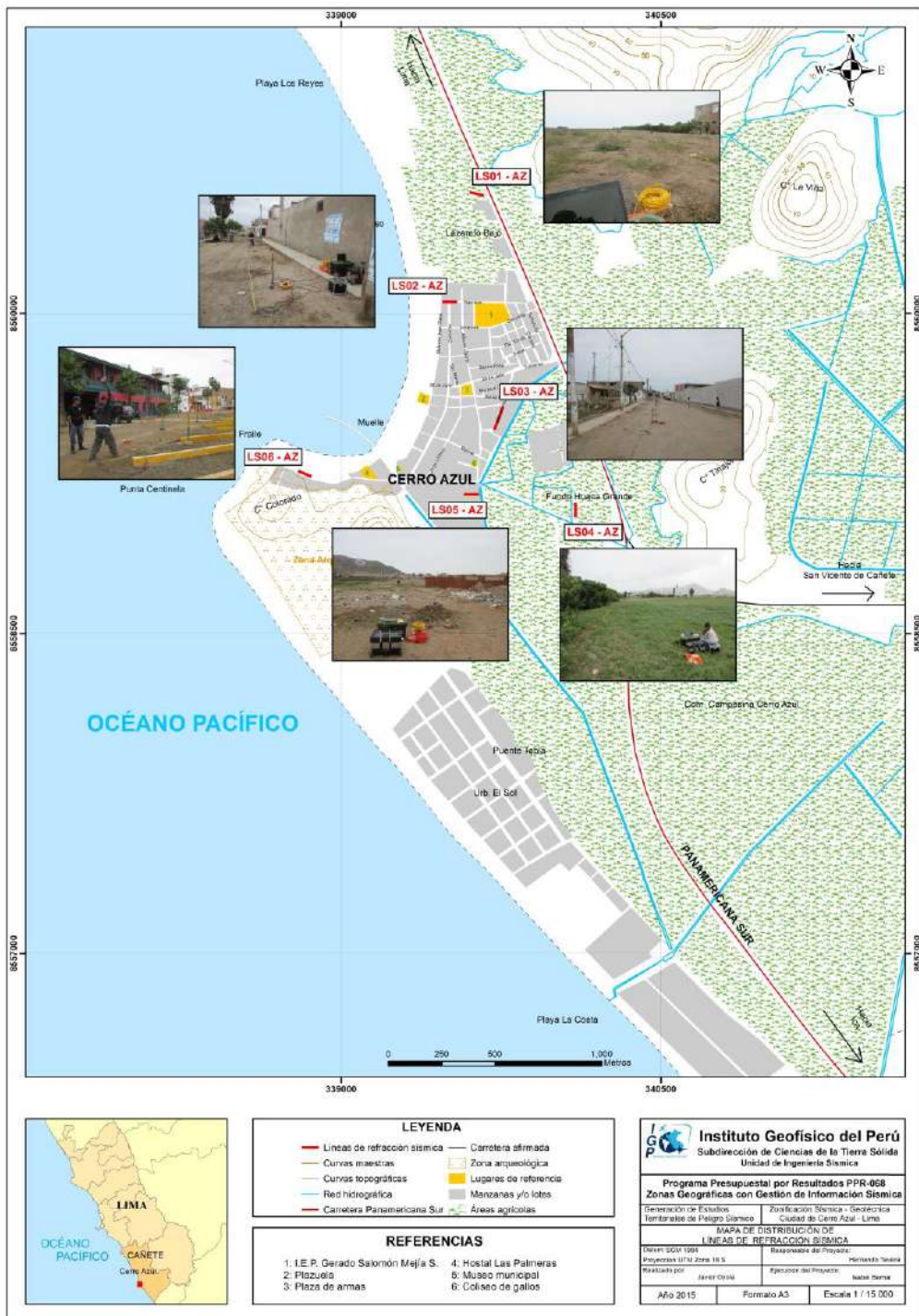


Figura 49: Mapa de la ciudad de Cerro Azul y distribución espacial de las líneas de refracción sísmica codificadas como: LS01-AZ, ..., LS6-AZ.

Tabla 10. Coordenadas y características de las líneas sísmicas

Línea sísmica	Este (m)	Sur (m)	Cota (m)	Espaciamiento entre geófonos (m)	Longitud total de registro (m)
LS01-AZ	339670	8560554	17	3	69
	339603	8560568	17		
LS02-AZ	339473	8560054	21	3	69
	339543	8560055	21		
LS03-AZ	339760	8559564	24	5	115
	339719	8559456	24		
LS04-AZ	340099	8559045	22	3	69
	340098	8559112	24		
LS05-AZ	339647	8559152	24	3	69
	339575	8559151	24		
LS06-AZ	338861	8559235	17	3	69
	338798	8559262	17		



Figura 50: Observaciones y recolección de datos sísmicos en la ciudad de Cerro Azul sobre suelos con alto contenido de humedad

- Suelos blandos, velocidades $V_s < 180$ m/s
- Suelos duros, velocidades V_s 180 a 500 m/s
 - . Suelos moderadamente duros, velocidades 180 a 350 m/s
 - . Suelos duros, velocidades 350 a 500 m/s
- Suelos muy duros o roca blanda, velocidades V_s 500 a 1500 m/s

A continuación, se describe las características de cada uno de los perfiles sísmicos construidos para conocer la velocidad de las ondas de corte (V_s) en la ciudad de Cerro Azul y alrededores (Figura 51).

.- Línea sísmica LS01-AZ: Línea sísmica realizada al costado de la Panamericana Sur, a 80 m al NO del vivero Las Thujas. El perfil de velocidad Vs muestra resultados confiables hasta una profundidad de 23 metros, indicando la presencia de suelos conformados por dos capas. La primera de 4 metros de espesor y velocidad de 108 m/s, correspondiendo a suelos blandos, asentados sobre una segunda capa de 7 metros de espesor y velocidad Vs de 243 m/s, que corresponde a suelos moderadamente duros. La superficie de contacto con el semiespacio presenta velocidades mayores a 399 m/s y corresponde a suelos duros (Figuras 51a). En superficie se identificó suelos areno - arcillosos.

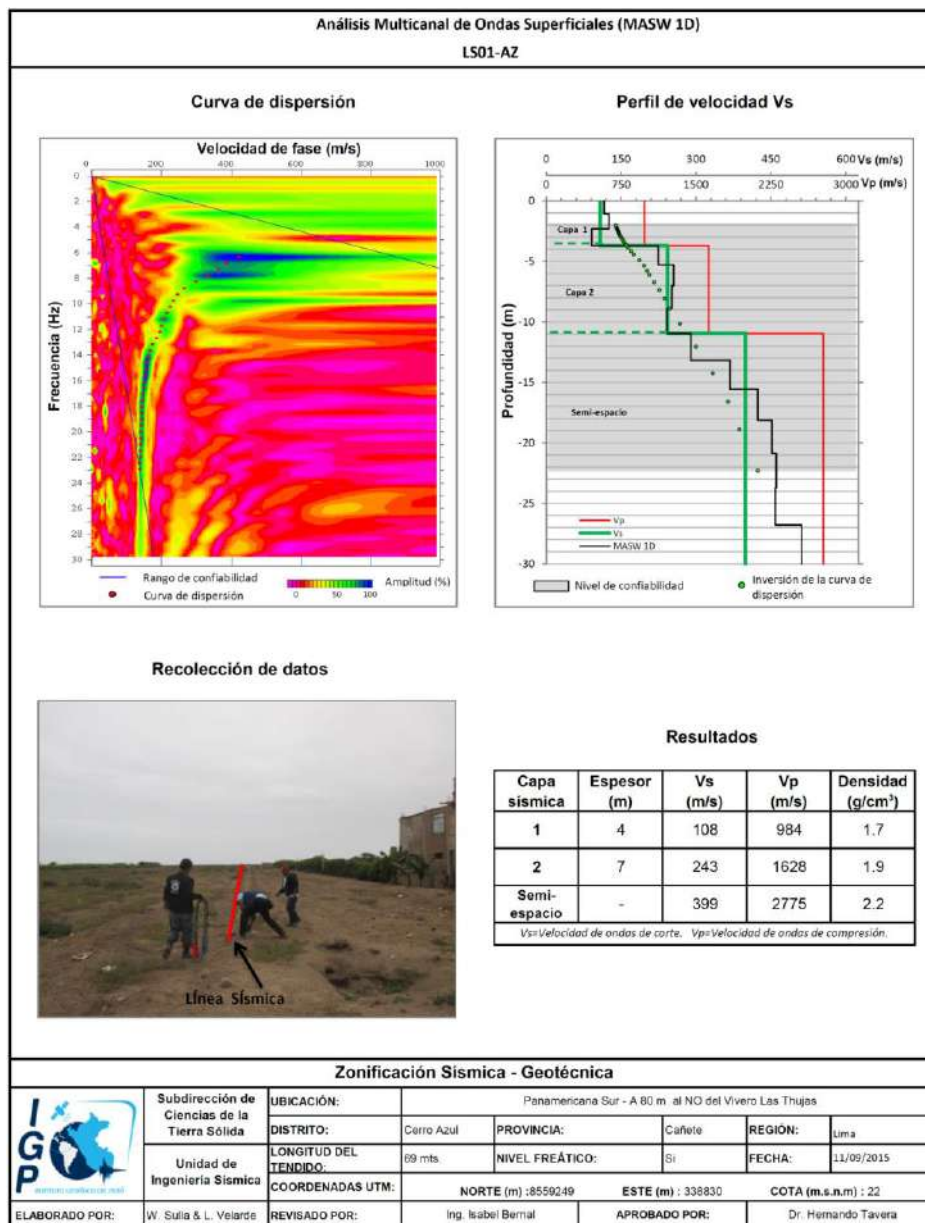


Figura 51.a: Análisis e interpretación geofísica obtenida con el método MASW para la línea LS01- AZ.

.- Línea sísmica LS02-AZ: Línea sísmica realizada en la calle Los Narcisos, ubicada en el extremo noroeste del área urbana. El perfil de velocidad V_s muestra resultados confiables hasta una profundidad de 20 metros, indicando la presencia de suelos conformados por dos capas. La primera de 4 metros de espesor con una velocidad V_s de 171 m/s, corresponde a suelos blandos, asentados sobre una segunda capa de 7 metros de espesor con velocidad V_s de 265 m/s y que corresponde a suelos moderadamente duros. La superficie de contacto con el semiespacio presenta velocidades V_s de 454 m/s, que sugiere suelos duros (Figura 51b). En superficie se identificó suelos aluviales.

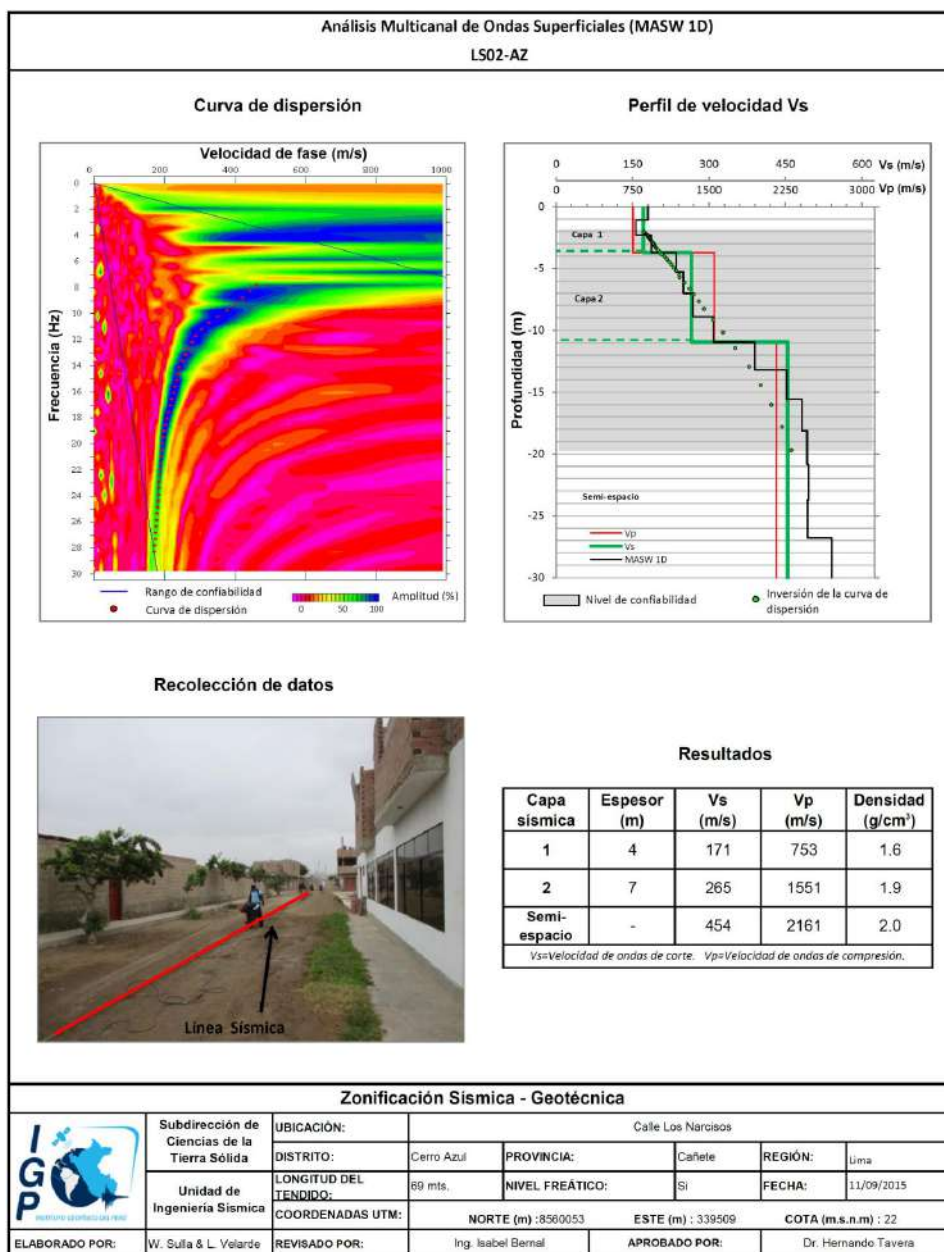


Figura 51.b: Análisis e interpretación geofísica obtenida con el método MASW para la línea LS02- AZ.

- Línea sísmica LS03-AZ: Línea sísmica realizada en la calle Miguel Grau, ubicada en la parte noreste de la ciudad de Cerro Azul. El perfil de velocidad Vs muestra resultados confiables hasta una profundidad de 16 metros, identificándose la presencia de suelos conformados por una capa de 4 metros de espesor y velocidades Vs de 174 m/s, que corresponde a suelos blandos. La superficie de contacto con el semiespacio presenta una velocidad Vs de 227 m/s y estaría conformada por suelos moderadamente duros (Figura 51c).

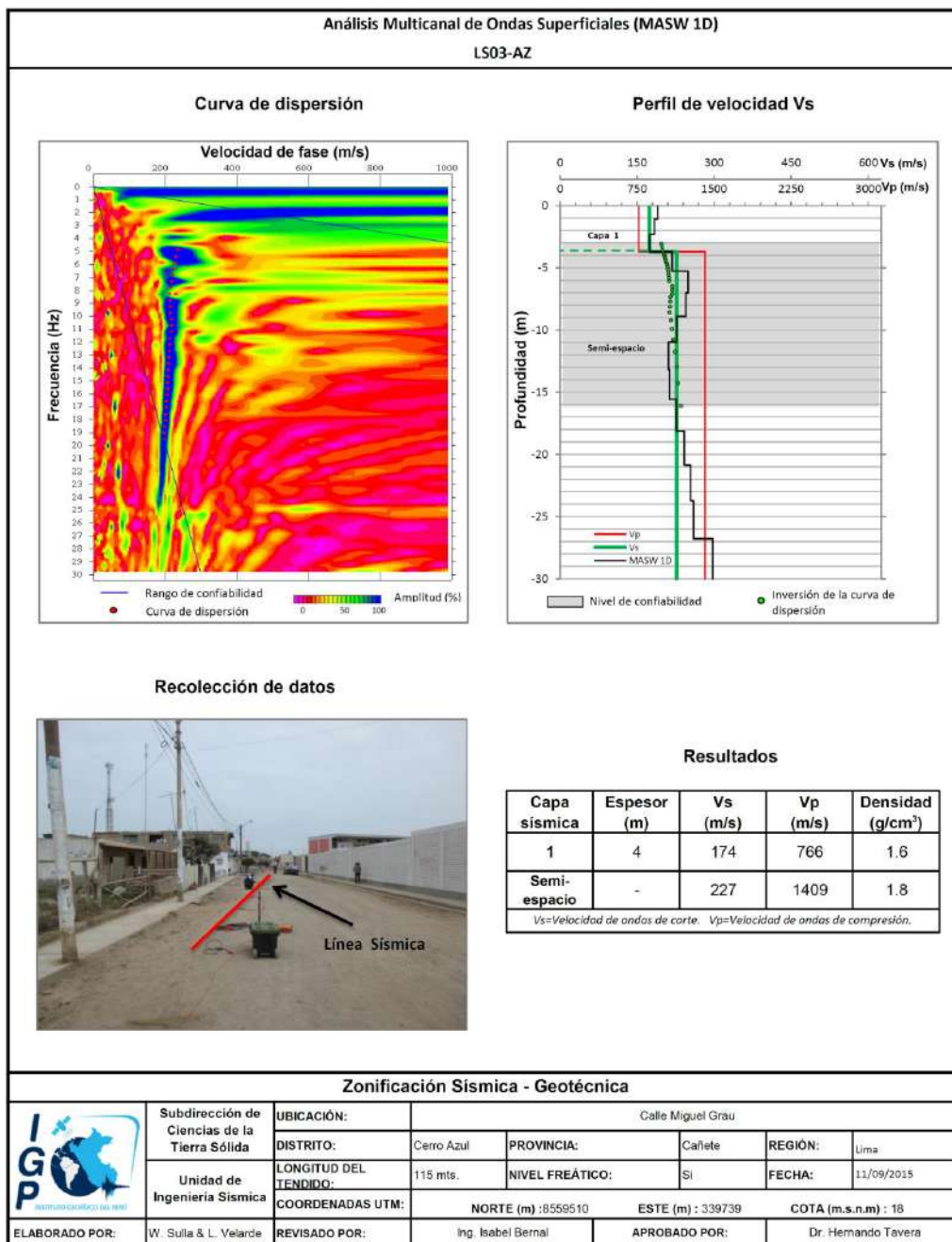


Figura 51.c: Análisis e interpretación geofísica obtenida con el método MASW para la línea LS03- AZ.

.- **Línea sísmica LS04-AZ:** Línea sísmica realizada a 750 metros al extremo SE de la plaza de Armas de Cerro Azul. El perfil de velocidad Vs muestra resultados confiables hasta una profundidad de 14 metros, identificándose la presencia de suelos conformados por una capa, con un espesor de 4 metros y velocidad de 133 m/s que corresponde a suelos blandos. La superficie de contacto con el semiespacio presenta velocidades Vs de 221 m/s, sugiere suelos moderadamente duros (Figura 51d). En superficie se observa terrenos de cultivo con alta humedad.

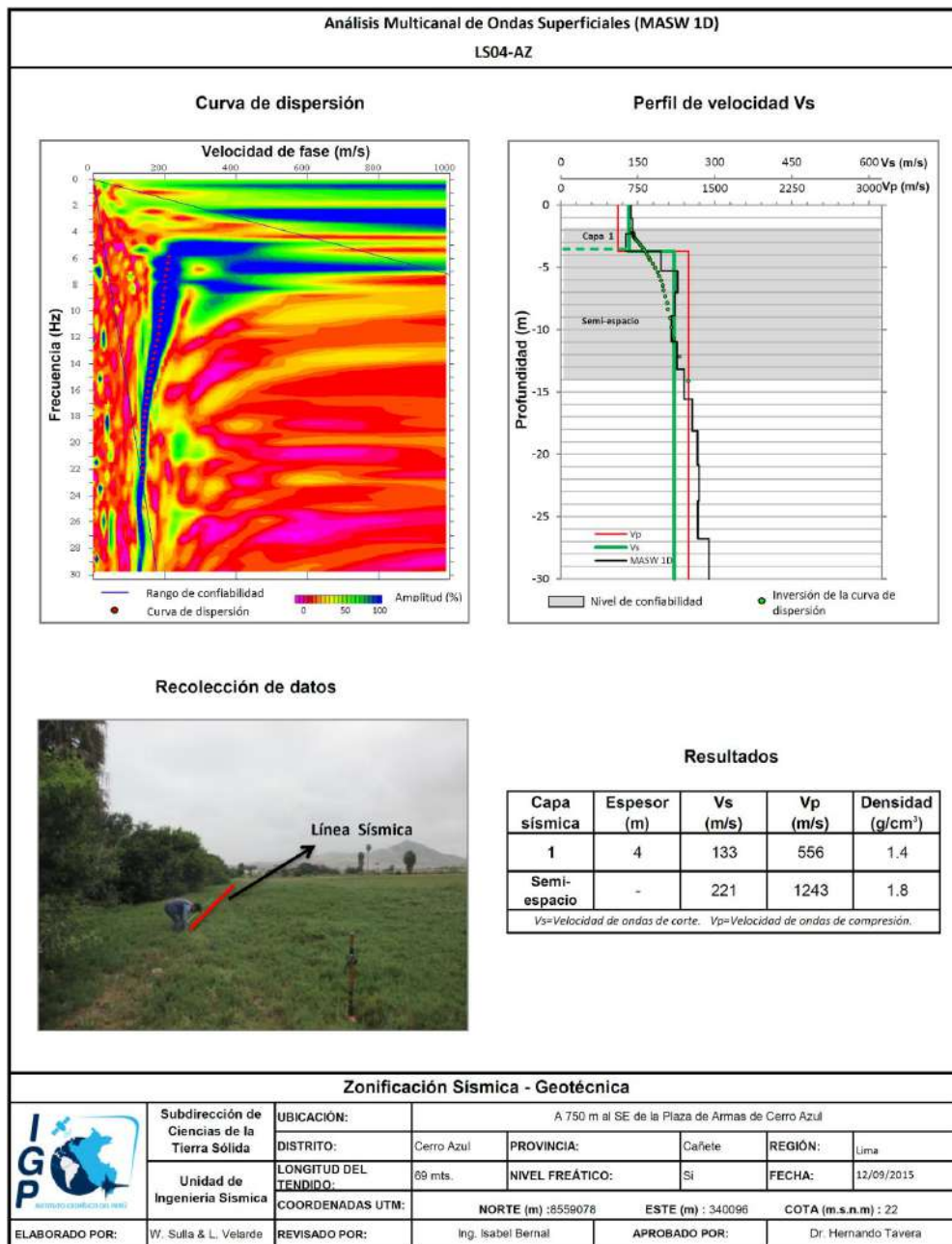


Figura 51.d: Análisis e interpretación geofísica obtenida con el método MASW para la línea LS04- AZ.

.- Línea sísmica LS05-AZ: Línea sísmica realizada en el centro comunal de Cerro Azul, extremo sur de la ciudad. El perfil de velocidad Vs muestra resultados confiables hasta una profundidad de 30 metros, identificándose la presencia de suelos conformados por una capa de 2 metros de espesor y velocidades Vs de 164 m/s, corresponde a suelos blandos. La superficie de contacto con el semiespacio presenta velocidades Vs de 244 m/s, lo cual sugiere la presencia de suelos moderadamente duros (Figura 51e). En superficie se observó la presencia de suelos con alto contenido de humedad.

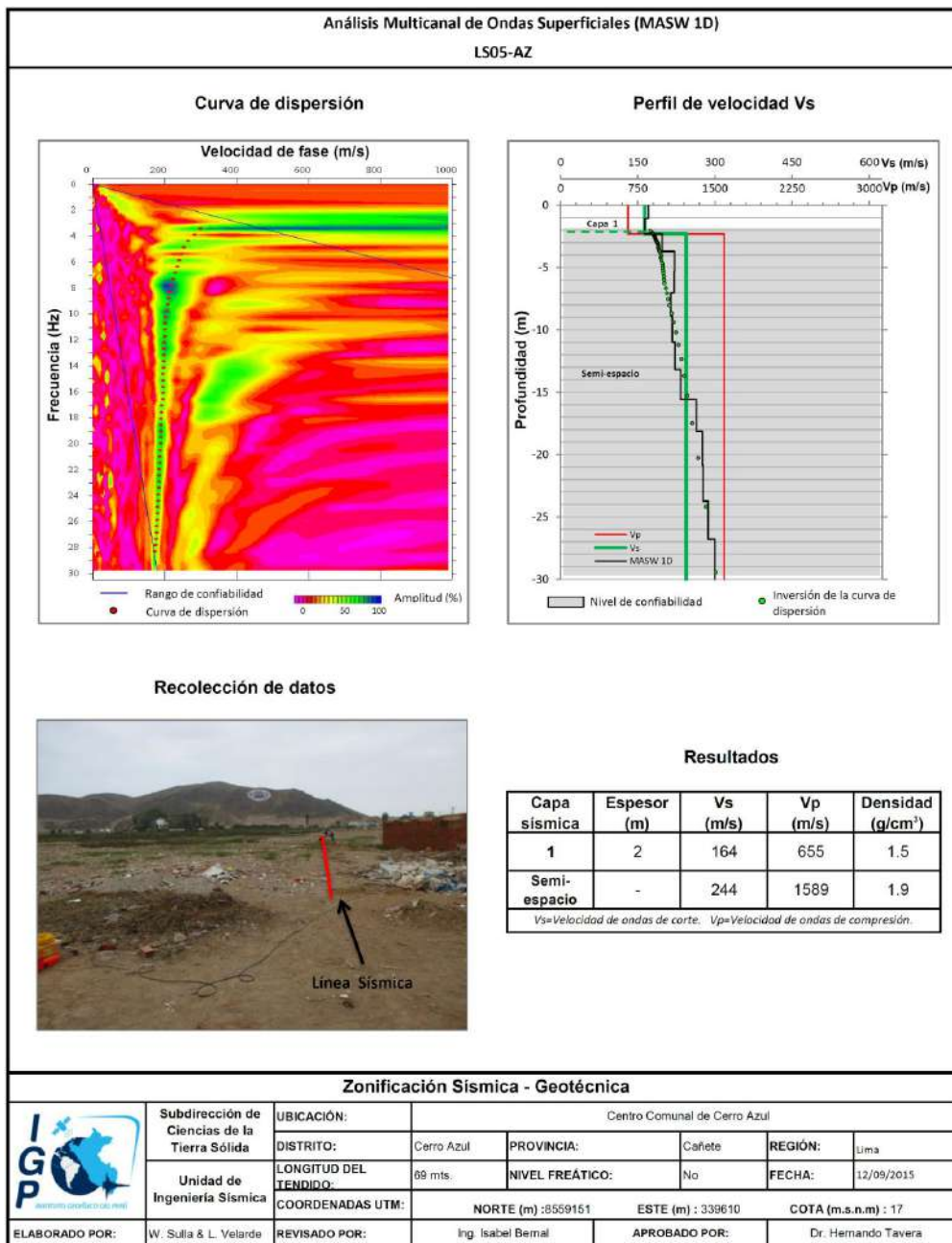


Figura 51.e: Análisis e interpretación geofísica obtenida con el método MASW para la línea LS05- AZ.

.- Línea sísmica LS06-AZ: Línea sísmica realizada en la calle Rivera del Mar (área de playa), extremo oeste de la ciudad. El perfil de velocidad V_s muestra resultados confiables hasta una profundidad de 21 metros, identificándose la presencia de suelos conformados por una capa de 4 metros de espesor y velocidad V_s de 239 m/s que sugiere la presencia de suelos moderadamente duros. La superficie de contacto con el semiespacio presenta velocidades mayores a 319 m/s, lo que sugiere la presencia de suelos moderadamente duros (Figura 51f).

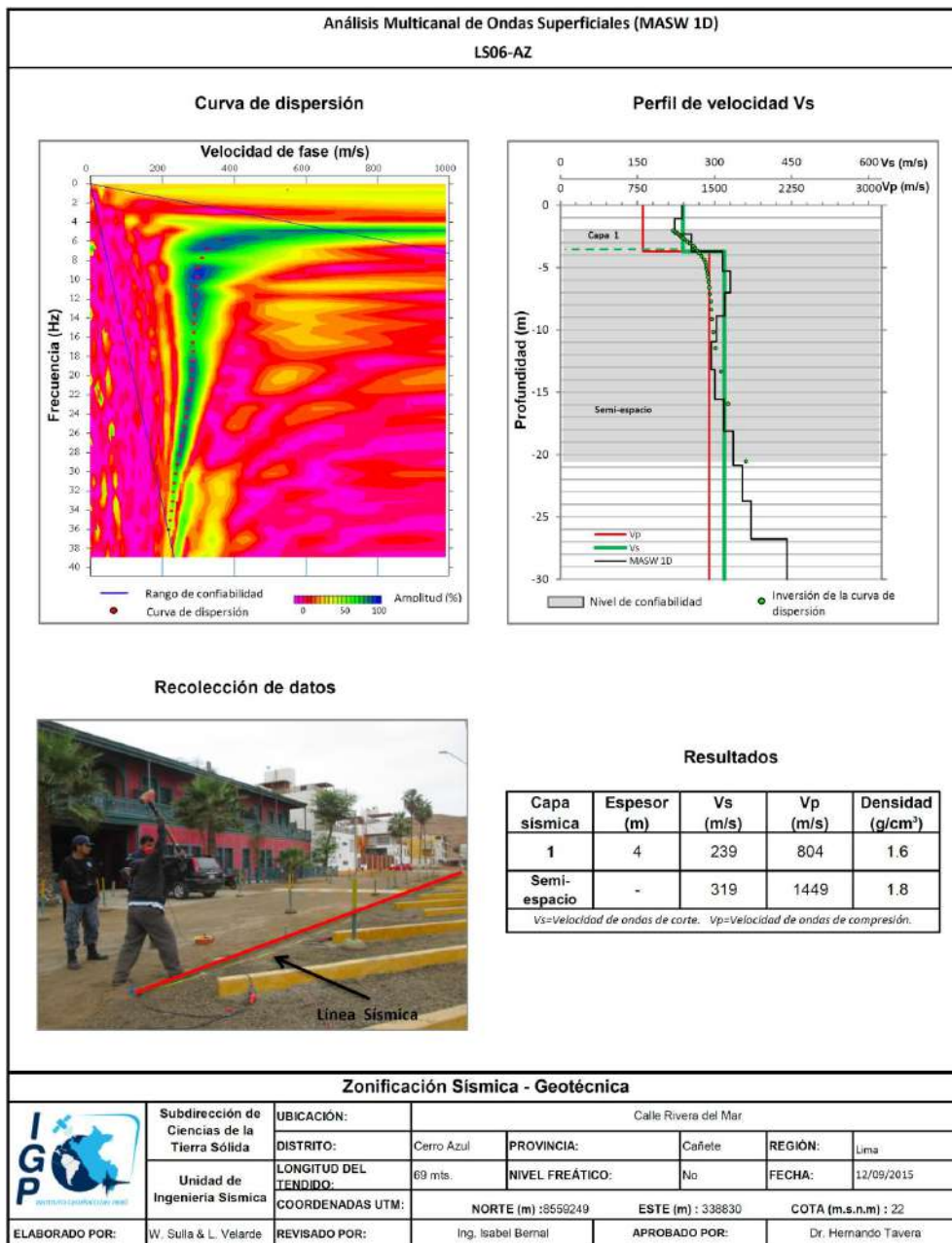
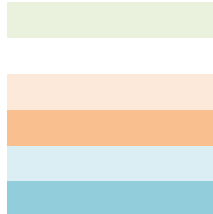


Figura 51.f: Análisis e interpretación geofísica obtenida con el método MASW para la línea LS06- AZ.

La Tabla 11, muestra de manera resumida el espesor y la velocidad de las capas sísmicas de cada línea sísmica.

Tabla 11. Valores de espesor y velocidad Vs de las líneas sísmicas.

Línea sísmica	N° Capas				
	1		2		Semi-espacio
	Vs (m/s),	Esp. (m)	Vs (m/s)	Esp. (m)	Vs (m/s)
LS01-AS	108	4	243	7	399
LS02-AS	171	4	265	7	454
LS03-AS	174	4	227	-	
LS04-AS	133	4	221	-	
LS05-AS	164	2	244	-	
LS06-AS	239	4	319	-	
<i>Suelos blandos (Vs < 180 m/s)</i> <i>Suelos duros (Vs=180 m/s - 500m/s)</i> <i>moderadamente duros (180 - 350)</i> <i>duros (350 -500)</i> <i>Suelos muy duros o roca blanda (Vs=500m/s-800m/s)</i> <i>Rocas moderadamente duras (Vs=800 m/s - 1500 m/s)</i>					

De acuerdo a la geología del área de estudio, gran parte del distrito de Cerro Azul se encuentra asentado sobre depósitos marinos y aluviales, estando el estrato más superficial constituido por materiales orgánicos, húmedos y en algunas zonas, cultivable. Este estrato estaría correlacionando con la primera capa sísmica identificado con el método MASW, baja velocidad (entre 100 a 180 m/s) y con espesores de 4 metros: líneas LS01, LS02, LS03 y LS04 ubicados en el extremo este de la Plaza de Armas. Capa de 2 m de espesor en la línea LS05, ubicado en los terrenos del centro comunal.

La segunda capa sísmica y en algunos casos el simi-espacio, tienen velocidades entre 200 a 300 m/s con espesores de 7 metros en las líneas LS01 y LS02, mayores a 10 metros en las líneas LS03, LS04 y LS05; en ambos casos, corresponden a depósitos aluviales con alto contenido de humedad. En las Líneas LS01 y LS02, ubicadas en el extremo norte del distrito de Cerro Azul, las velocidades son mayores a los 400 m/s; por lo que, formaría parte del material aluvial pero en estado compacto.

11.3.- Periodos dominantes

Para presentar los resultados finales obtenidos con la técnica H/V, los valores de frecuencias fueron transformados a periodos dominantes y para construir el mapa de periodos, se asignó a cada punto de medición un radio de confiabilidad de 10 metros, lo cual facilita los procedimientos seguidos para la zonificación de los suelos.

En la Figura 52 se muestra la distribución espacial de los valores de periodos dominantes en la ciudad de Cerro Azul. Los resultados obtenidos permiten definir que en un alto porcentaje del área de estudio, predominan periodos mayores a 0.4 segundos, distribuyéndose sobre el área céntrica de la ciudad y en la zona de expansión de la ciudad, extremo sur del Cerro Camacho. Asimismo, estos periodos tienden a valores menores, conforme se avanza hacia los cerros, siendo coherente con la geomorfología de la zona.

Los periodos dominantes que caracterizan a los suelos de la ciudad de Cerro Azul están relacionados por sus condiciones físico-dinámicas a través de la relación $T_0=4H/V_s$ (T_0 , periodo dominante; H, espesor del estrato y V_s , velocidad de onda de corte). Entonces, conocidos los periodos y la velocidad de las ondas de corte (V_s), se puede proceder a calcular los espesores de las capas del suelo.

Asumiendo, velocidades de 180 m/s y 300 m/s para las ondas de corte (V_s) y periodos de 0.3 y 0.6 segundos, se estima para la capa superficial presente en el área urbana de Cerro Azul, espesores que varían entre 12 a 45 metros aproximadamente. Estos valores son confirmados con los modelos de velocidad y espesores de capas obtenidos con los métodos geofísicos.

11.4.- Estudios de tomografía eléctrica

La tomografía eléctrica permite obtener información sobre las propiedades físicas del subsuelo mediante la evaluación del parámetro de resistividad al paso de la corriente eléctrica. Esta propiedad permite conocer la resistividad del subsuelo asociado a la presencia de capas con mayor o menor contenido de agua. Conocidas las resistividades del suelo ($\Omega.m$), por medio de secciones transversales (2-D) se modela versus la profundidad y los resultados son validados con datos

geológicos. En la ciudad de Cerro Azul y alrededores se han realizado 4 líneas de tomografía eléctrica con el dispositivo polo-dipolo (Figura 53) y la distribución de 25 electrodos a fin de alcanzar tendidos de 138 y 240 metros, lo cual permitió tener alcances en profundidad del orden de 24 y 40 metros (Tabla 12).

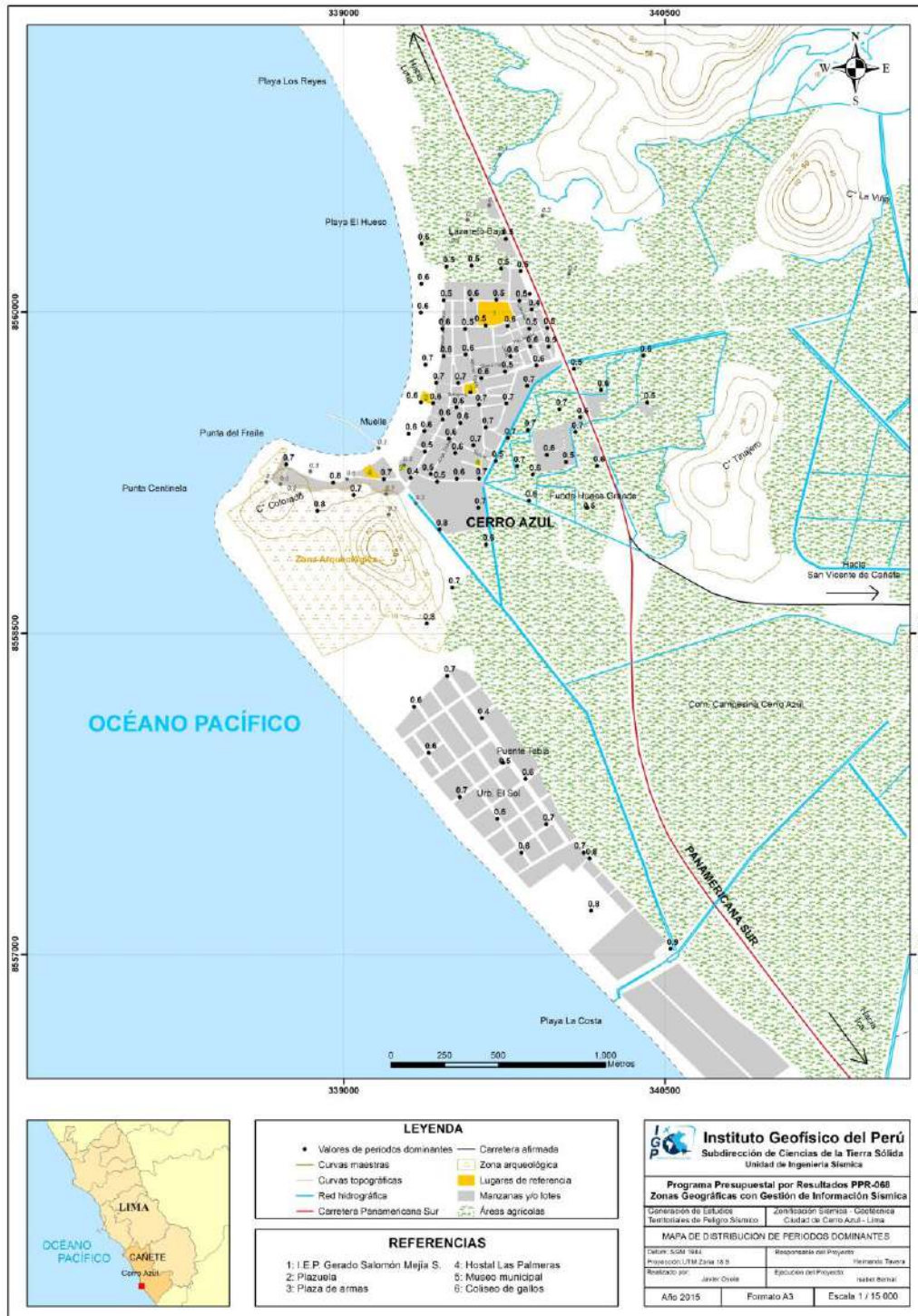


Figura 52: Mapa de distribución espacial de valores de periodos dominantes en la ciudad de Cerro Azul

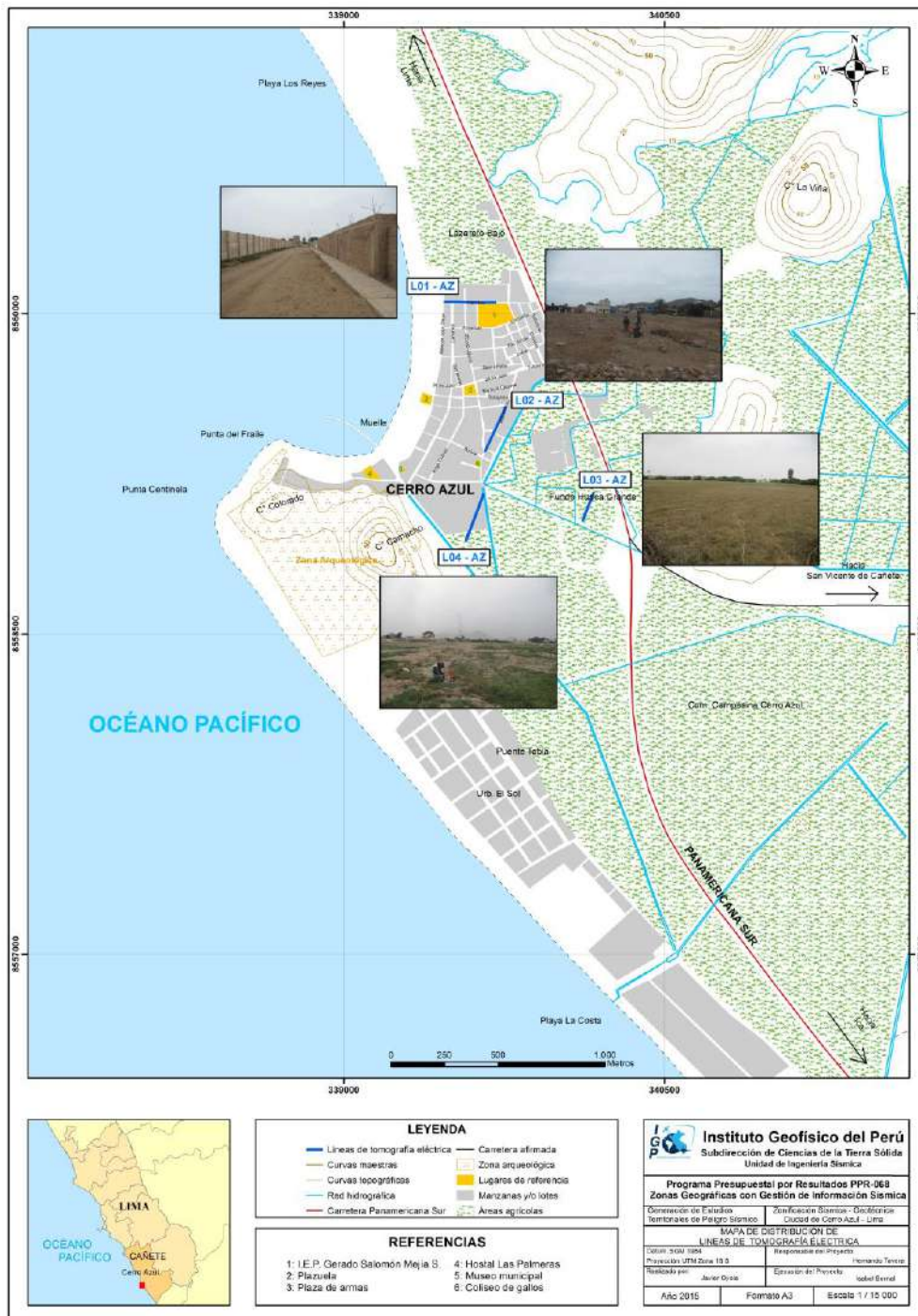


Figura 53: Mapa de la ciudad de Cerro Azul y ubicación de las 4 líneas de tomografía eléctrica.

Tabla 12: Características de las líneas eléctricas.

Nombre de la Línea o sección geo-eléctrica	Separación de Dipolo / Número de electrodos	Extensión de la línea
LE01-AZ	10 m / 25 Electrodo	240 m
LE02-AZ	10 m / 25 Electrodo	240 m
LE03-AZ	6 m / 25 Electrodo	138 m
LE04-AZ	10 m / 25 Electrodo	240 m

A continuación, se describe las características de cada una de las secciones geo-eléctricas realizadas y cuya información permitirá conocer el valor real de la resistividad del subsuelo en la ciudad de Cerro Azul y alrededores (Figura 54).

.- Línea de Tomografía Eléctrica LE01-AZ: Línea eléctrica realizada en la calle Las Américas, extremo norte del área urbana de la ciudad. La profundidad alcanzada es de 40 metros con el predominio de valores bajo resistivos. Los valores entre 100 a 500 ohm.m se encuentran en tres tramos superficiales de la línea, el primero entre las estaciones -10 a 100, 132 a 170 y entre las estaciones 210 a 230, todos con espesores variables. Desde la estación 100 hasta el final de la línea (extremo E), se observa la presencia de valores menores a 20 ohm.m en profundidad. Los valores de resistividad que van de 21 a 99 ohm.m, se encuentran a lo largo de toda la línea. En general, estos valores bajos de resistividad pueden ser asociados a la presencia de salinidad en la zona (Figura 54a). Los materiales que conforman la parte superficial de la línea son arenas.

.- Línea de Tomografía Eléctrica LE02-AZ: Línea eléctrica realizada al costado del colegio José Olaya, parte central de la ciudad de Cerro Azul. A lo largo de la línea se observa el predominio de valores muy bajo resistivos. Las resistividades mayores a 20 ohm.m afloran en superficie entre las estaciones 35 a 80 con espesores irregulares y entre las estaciones 90 a 120, para luego extenderse en profundidad de manera irregular. Valores de resistividad entre 4 a 20 ohm.m se encuentran en toda la línea con espesores variables (Figura 54b). Los materiales que conforman la parte superficial de la línea son arenas, limos, gravas y material de relleno.

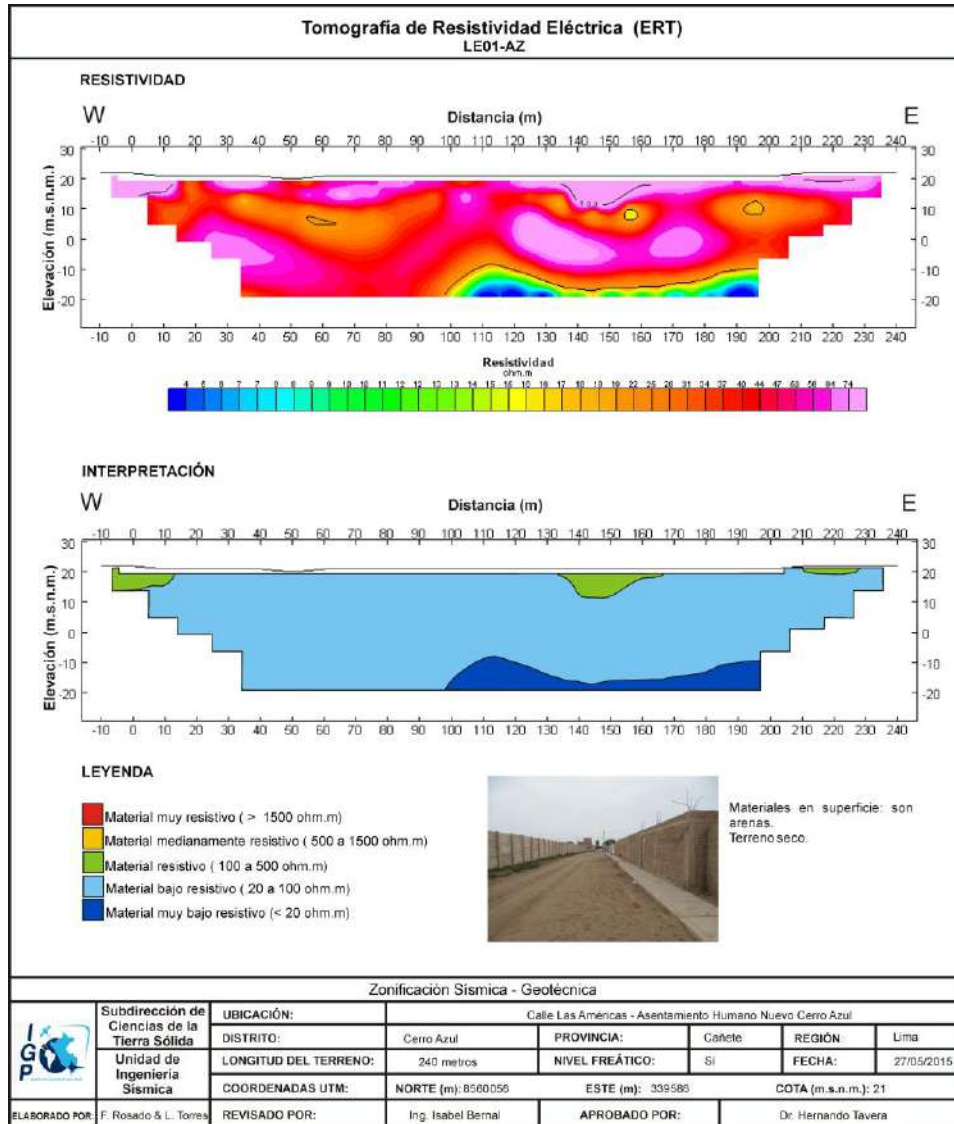


Figura 54.a: Análisis e interpretación geofísica obtenida con el método de tomografía eléctrica para la línea LE01-AZ.

.- Línea de tomografía eléctrica LE03-AZ: Línea eléctrica realizada en la Prolongación López de Zúñiga, extremo este de la ciudad de Cerro Azul. La profundidad alcanzada es de 24 metros con el predominio de valores muy bajo resistivos a lo largo de la línea. Los valores de resistividad menores a 20 ohm.m, se distribuyen desde la superficie a mayor profundidad, llegando a cubrir la totalidad de la línea (Figura 54c). Los materiales que conforman la parte superficial de la línea son limos, además se tenerse la presencia de vegetación.

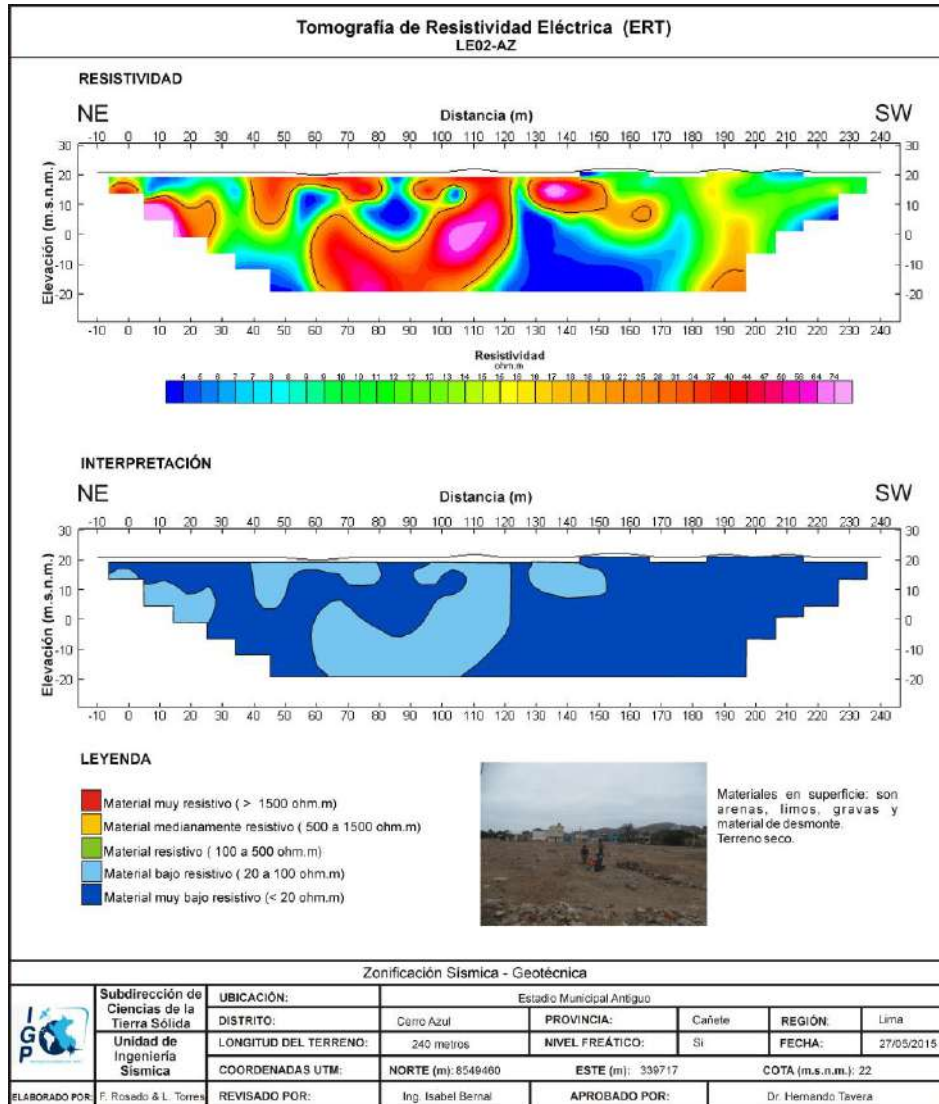


Figura 54b: Análisis e interpretación geofísica obtenida con el método de tomografía eléctrica para la línea LE02-AZ.

- Línea de tomografía eléctrica LE04-AZ: Línea eléctrica realizada en los terrenos de la comunidad de agricultores de Cerro Azul, extremo sur de la ciudad. La profundidad alcanzada es de 40 metros con el predominio de valores muy bajos resistivos a lo largo de la línea. En general, se observa la presencia de valores de resistividad entre 21 a 100 ohm.m, desde la estación 60 a 120 con tendencia a estar presentes en superficie. Por otro lado, valores que van de 4 a 20 ohm.m están presentes cerca de la superficie a lo largo de toda la línea para luego extenderse en profundidad. Estos valores pueden asociarse a la presencia de un canal de agua y terrenos de cultivo cerca de la línea (Figura 54d). Los materiales que conforman la parte superficial de la línea son arena, gravas y desmorte de limos; además se tiene vegetación y humedad.

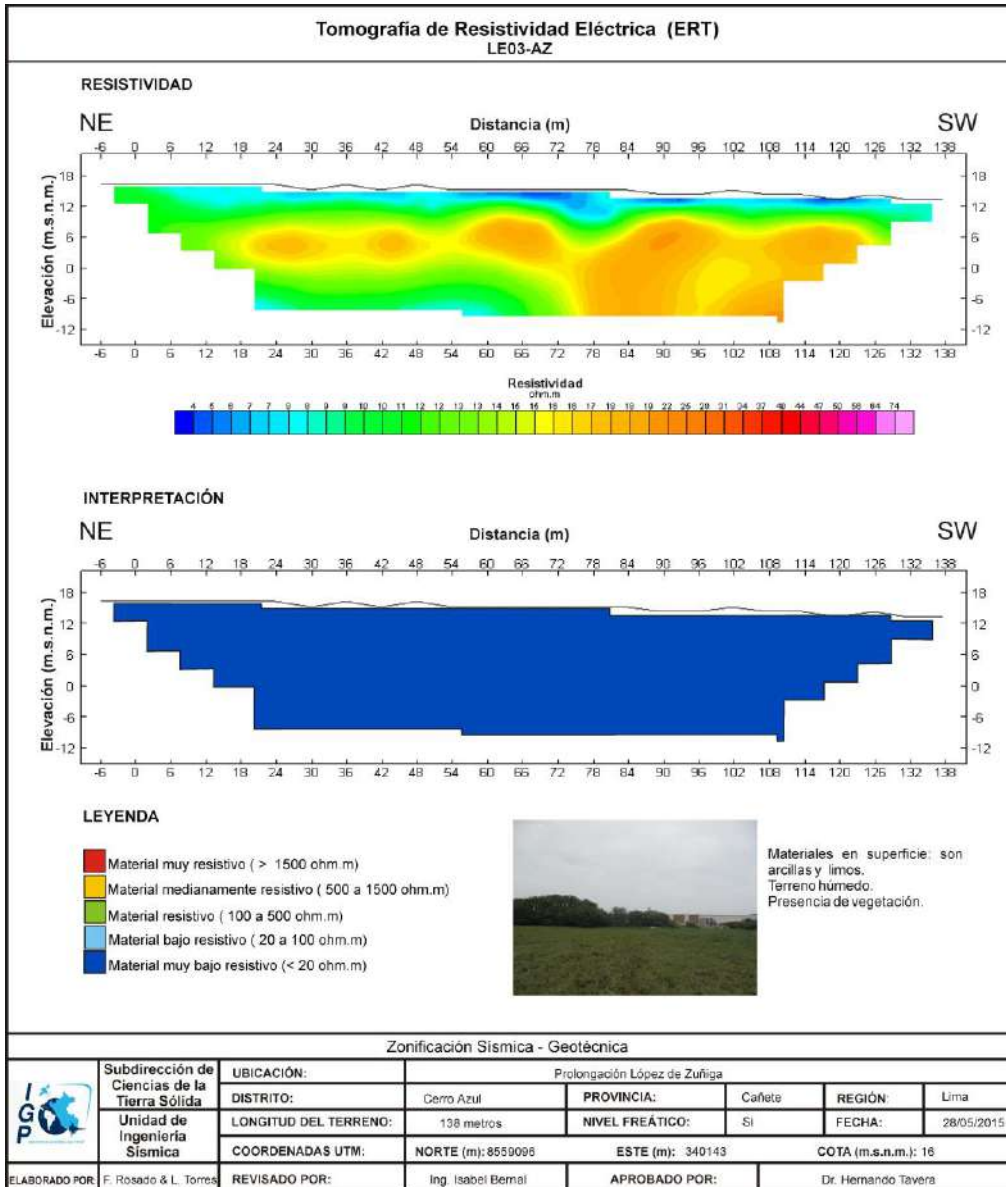


Figura 54c: Análisis e interpretación geofísica obtenida con el método de tomografía eléctrica para la línea LE03-AZ.

Los resultados obtenidos en este estudio permiten considerar que en la ciudad de Cerro Azul, predominan suelos con valores bajos a muy bajos resistivos (2 - 50 ohm.m) y espesores que varían de entre los 20 y 40 metros. Estos valores indican que el nivel freático en la zona de estudio es alto debido a su proximidad al litoral y la infiltración del agua de mar.

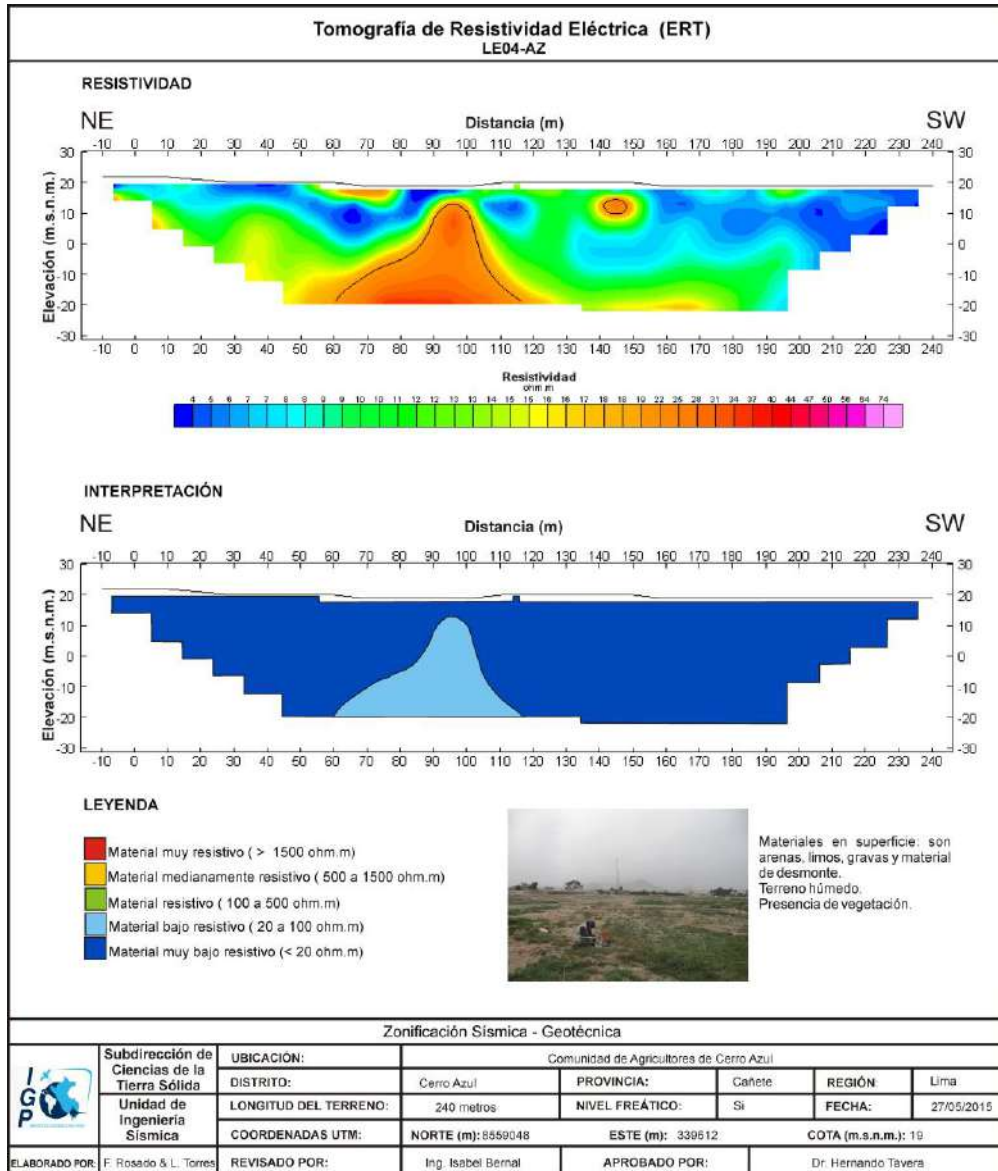


Figura 54d: Análisis e interpretación geofísica obtenida con el método de tomografía eléctrica para la línea LE04-AZ.

12.- ZONIFICACIÓN SÍSMICA - GEOTÉCNICA

El Mapa de Zonificación Sísmica-Geotécnica para la ciudad de Cerro Azul y alrededores considera el análisis e interpretación de la información geológica, geomorfológica, geodinámica, geotécnica, sísmica y geofísica. Para la ciudad de Cerro Azul, las características dinámicas del suelo han permitido identificar, de acuerdo a la Norma de Construcción Sismorresistente (Norma E-030), la existencia de tres tipos de suelos: Tipo S1, S3 y S4, este último asociado a condiciones excepcionales.

12.1.- Mapa de Zonificación Sísmica - Geotécnica

Para la ciudad de Cerro Azul se propone la siguiente zonificación Sísmica – Geotécnica (Figura 55):

.- ZONA I: Conformada por estratos de grava coluvial cubiertos por un estrato de material fino de poco espesor. Este suelo tiene un comportamiento semi-rígido con periodos de vibración natural que varían entre 0.1 y 0.3 segundos, correspondiendo a suelos Tipo S1 de la norma sismorresistente peruana. Esta zona presenta velocidades de ondas de corte (V_s) del orden de 300m/s. La zona presenta suelos con capacidad portante de 2.0 kg/cm².

.- ZONA III: Zona conformada, en su mayor parte, por depósitos aluviales de gran espesor y alto nivel freático. Los periodos predominantes encontrados en estos suelos varían entre 0.5 y 0.7 s, por lo que su comportamiento dinámico ha sido tipificado como suelo Tipo S3 de la norma sismorresistente peruana. En la zona las velocidades de las ondas de corte (V_s) son menores a 200m/s. La zona presenta suelos con capacidad portante de 1.0 kg/cm².

.- ZONA IV: Conformada por depósitos marinos y suelos pantanosos. El comportamiento dinámico de estos suelos han sido tipificados como suelos Tipo S4 de la norma sismorresistente peruana (Según la Norma E03, es un caso especial y/o condiciones excepcionales).

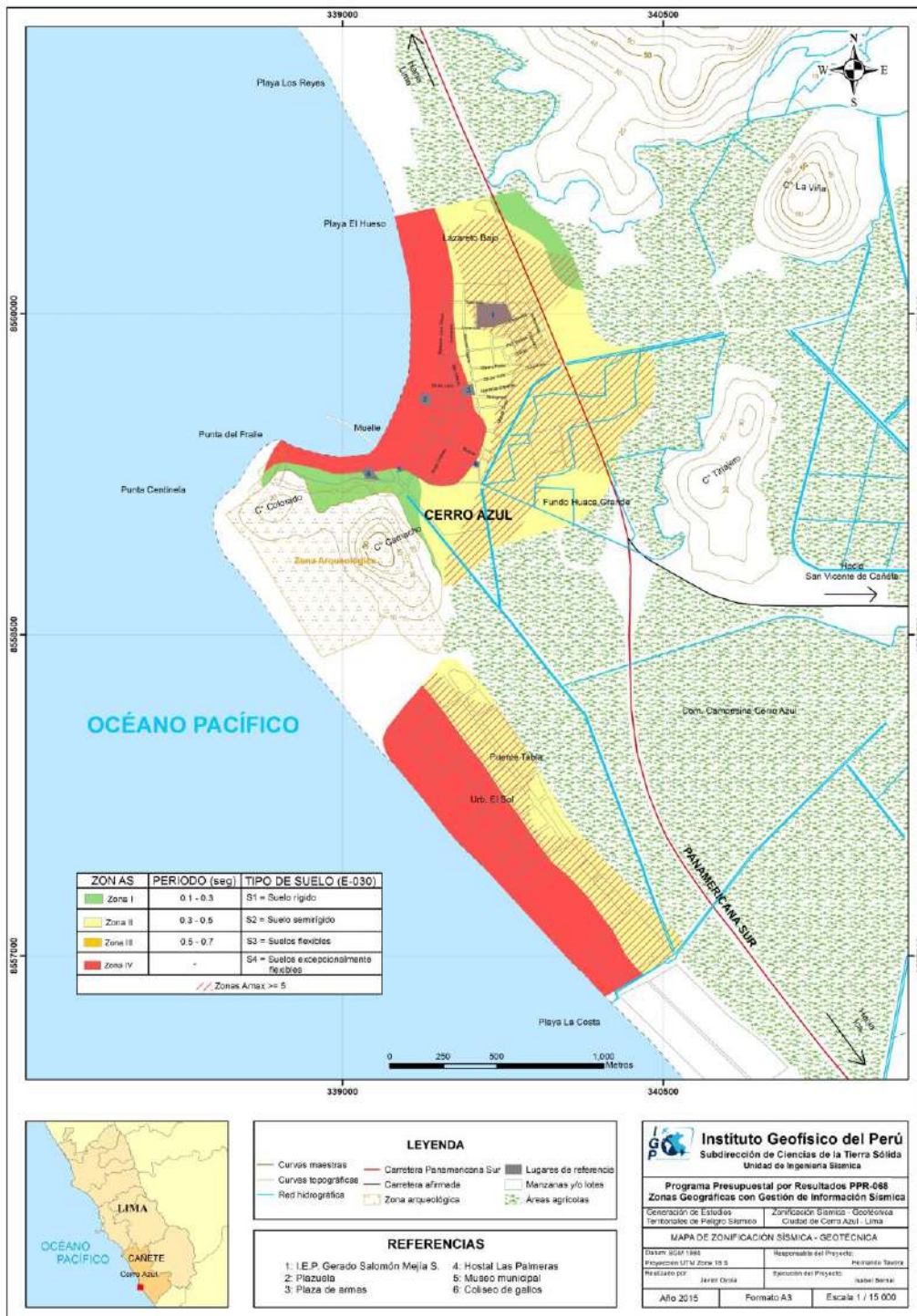


Figura 55: Mapa de zonificación Sísmica – Geotécnica para la ciudad de Cerro Azul y alrededores

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El estudio de Zonificación Sísmica-Geotécnica (Comportamiento Dinámico del Suelo) para la ciudad de Cerro Azul y alrededores, ha permitido llegar a las siguientes conclusiones y recomendaciones:

CONCLUSIONES

El 80 % de la superficie del área urbana de la ciudad Cerro Azul se asienta sobre la unidad geomorfológica terraza aluvial; mientras que, el 20% restante está ocupado por dunas, lomas, playa y bahía. Los materiales que conforman el subsuelo en la ciudad de Cerro Azul corresponden a depósitos aluviales (gravas y arenas subredondeadas) y como substrato rocoso se tiene a rocas volcánicas del tipo andesitas de la Formación Pucusana, que afloran en la loma Camacho, sector Puente Tabla. En el área de estudio se ha identificado como evento geodinámico la caída de rocas, presente en el sector Colina Blanca, ubicado a 1 km al este del centro urbano de la ciudad. Asimismo, el proceso de oleaje ha deteriorado el malecón de Cerro Azul y el desgaste de la loma Camacho.

El Mapa de Zonificación Sísmica-Geotécnica para la ciudad de Cerro Azul y alrededores ha permitido identificar, de acuerdo a la Norma de Construcción Sismorresistente (Norma E-030), la existencia de tres tipos de suelos: Tipo S1, S3 y S4, este último asociado a condiciones excepcionales observadas a lo largo de la zona costera.

RECOMENDACIONES

Para los planes de ordenamiento territorial se debe tener en cuenta los procesos de caída de rocas, así como la presencia del nivel freático en la ciudad a profundidades de 1.20 metros, principalmente en la calle Ribera del Mar que presenta alto potencial de licuación de suelos. Este documento técnico debe ser utilizado por las autoridades locales y regionales de la ciudad de Cerro Azul para una mejor Gestión del Riesgo ante la ocurrencia de sismos y efectos secundarios. Del mismo modo, para aportar con las normativas necesarias para el desarrollo y expansión urbana de la ciudad de Cerro Azul.

BIBLIOGRAFÍA

- Alfaro, A., Egozcue y A. Ugalde (1999): Determinación de características dinámicas del suelo a partir de microtemores. Memorias del Primer Congreso de Ingeniería Sísmica, España.
- Autoridad Nacional del Agua, ANA (2011) - Evaluación de recursos hídricos superficiales en la cuenca del río Chancay – Huaral.
- APESSEG (2005): Estudio de vulnerabilidad y riesgo sísmico en 42 distritos de Lima y Callao, CISMID, 10 pag.
- Aki, K., (1957): Space and time spectra of stationary stochastic waves, with special reference to microtemors. Bulletin of the Earthquake Research Institute, University of Tokyo 35, 415–457.
- Bard, P-Y. (1995) Effects of surface geology on ground motion: Recent results and remaining issues, In Proc. 10 European Conf. Earth. Eng., ed. Duma, Balkema, Rotterdam, 305-323
- Bard, P-Y y SESAME (2001) The SESAME project: an overview and main results. 13 World Conference on Earthquake Engineering Vancouver, B.C., Canada August 1-6, 2004 Paper No. 2207
- Beresnev, I.A., K.L. Wen, and Y.T. Yeh 1995a, “Nonlinear Soil Amplification: It’s Corroboration in Taiwan. Bull, Seism. Soc. Am., Vol. 85, pp. 496-515
- Bernal, I. (2002) Microzonificación sísmica de la ciudad de Tlaxcala, Mexico. Tesis de Maestría en Ciencias, UNAM, pag. 130.
- Bernal, I. (2006): Microzonificación Sísmica de la Ciudad de Tlaxcala – Mexico. Tesis de Maestría, II-UNAM, Mexico.
- Bernal, I. y H. Tavera (2007): Estimación de frecuencias predominantes y amplificaciones relativas en los terrenos del BCP-Ciudad de Trujillo. Informe presentado al BCP, 22p.
- Braja, M. (2001). Fundamentos de Ingeniería Geotécnica. Thomson y Learning, 580 pag.
- Capon, J.,(1973): Signal processing and frequency-wavenumber spectrum analysis for a large aperture seismic array, in *Methods in Computational Physics*, Vol. 13, ed. Bolt, B.A., Academic Press Inc, New York
- Carpio, J. y Tavera, H. (2002). Estructura de un catálogo de Tsunamis para el Perú basado en el Catalogo de Gustakov (2002). BSGP, V94, 45-59.
- Chlieh, M., Perfettini, H., Tavera, H., Avoac, J-P. (2011). Interseismic coupling and seismic potential along Central Andes subduction zone. J. G. R. Vol 116, B12405, doi:10.1029/2010JB008166
- Cruden, D. (1991). A simple definition of a landslide. IAEG. Bull. 43, 27-29.

- Casagrande, A. (1948): Classification and identification of soils, American Society of Civil Engineers, Transactions, Vol. 113, 901-991.
- Dale D. (1990). Mountain waves and Downslope Winds. Meteorological Monographs. 23:59 81
- Dorbath, L., Cistermas, A., Dorabath, C. (1990): Assessment in the size of large and great historical earthquake in Peru. B.S.S.A., 80,551-576
- Fäh D., Kind F. and Giardini D. (2002). Inversion of local S-wave velocity structures from average H/V ratios, and their use for the estimation of site effects. *Journal of Seismology*, 7, 449-467
- Felícísimo, M. (1994) - Modelos digitales del terreno. Oviedo-España: Pentalfa. 222 p. ISBN: 84-7848-475-2. 222 p.
- Fidel, L., Zavala, B., Núñez, S., Valenzuela, G. (2006) - Estudio de riesgos geológicos del Perú, Franja N° 4. INGEMMET, Boletín, Serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica, 29. 383 p.
- INDECI (2003) – Uso de suelos y medidas de Mitigación en la ciudad de Asia.
- Goto, C. y Ogawa, Y. (1992): Numerical Method of Tsunami Simulation with the Leap-frog Scheme. Translated for the TIME project by N Shuto.
- Guillier, B., J.-L. Chatelain . H. Tavera . H. Perfettini . A. Ochoa . B. Herrera (2014): Establishing empirical period formula for RC buildings in Lima (Peru): evidence for the impact of both the 1974 Lima earthquake and the application of the Peruvian seismic code on high-rise buildings (in preparation).
- Gutiérrez-Elorza, M. (2008). Geomorfología. Pearson Educación, S.A., Madrid, 898 pp.
- Gutierrez, C. y S.K. Singh (1992): A site effect study in Acapulco, Guerrero, Mexico: Comparison of results from strong motion and microtremor data, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 82, 642-659, 1992.
- Hartzel, S. H. (1992). Site response estimation from earthquake data. *Bull. Seism. Soc. Am.* 82, 2308-2327
- Hutchinson, J.N. (1986). A sliding-consolidation model for flow slides, *Can.Geotech.J.*, 23, 115-126
- INDECI (2001): Informes de los principales desastres ocurridos en Perú. Instituto de Defensa Civil del Perú.
- INDECI, (2002) - Plan de Usos de Suelos y Propuesta de Medidas de Mitigación de los efectos producidos por los Desastres Naturales de las ciudades de la provincia de Cañete.
- Knighton, A. (1998): Fluvial Forms & Processes: a new Perspective . Londres. Arnold
- Lachet, C. y P. Y. Bard (1994): Numerical and theoretical investigations on the possibilities and limitations of Nakamura's technique, *J. Phys. Earth.*, 42, 377-397 pp.

- Lermo, J. y F.J. Chávez-García (1994a): Are microtremors useful in site response evaluation?, *Bull. Seism. Soc. Am.* 84, 1350-1364 pp.
- Lermo, J. y F.J. Chávez-García (1994b): Site effect evaluation at Mexico City. Dominant period and relative amplification from strong motion and microtremors records, *Soil. Dyn. & Earthq. Eng.* 13, 413-423 pp.
- Loke MH (2001). Tutorial: 2 D and 3 D electrical imaging survey, Geotomo Software, Malaysia
Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2015) -
<http://renac.mtc.gob.pe/inventariovial/default2.aspx>
- Morisawa, M. (1968). Streams: their dynamics and morphology. McGraw-Hill. New York, New York, USA.
- Nakamura, Y., (1989): A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface, *QR of RTRI*, 30, No.1,25-33 pp.
- Norma E-30 (2016): Diseño sismorresistente en el Perú, SENCICO.
- Nuria, D. y A. González (1993): Propiedades dinámicas de edificios de la ciudad de México. 6tas. Jornadas Chilenas de Sismología e ingeniería antisísmica. Santiago, Chile, 1, pp. 585-594.
- Ordaz, M., A. Aguilar, J. Arboleda (2007): Program for computing seismic hazard: CRISIS-2007 V1.1., Institute of Engineering, UNAM, México.
- Okada, H. (2003): The Microtremor Survey Method, Geophysical monograph series, No 12, Society of exploration geophysicists, 135 pp.
- Palacios, O., y Caldas, J., y Vela, C., INGEMMET (1992) - Geología del Cuadrángulo de Chancay – Hoja 24i.
- Papazachos, et al. (2004): Global realltions between seismic fault parameters and momento magnitude of eathquakes. *Bull. Geol. Soc. of Greece*, 36, 1482-1489.
- PNUD (2010).: Riesgo sísmico y medidas de reducción del riesgo en Lima. PNUD, INDECI, Proyecto N° 00058530
- Sadigh, K., C. Chang, J. Egan, F. Makdisi, R. Young (1997): Attenuation relationship for shallow crustal earthquakes based on California Strong Motion Data, *Seis. Res. Lett.*, V-68, N-1, January/February.
- Salazar, H., & Landa, T., C., (1993) - Cuadrángulos de Mala (26-j), Lunahuaná (26-k), Tupe (26-l), Conayca (26-m), Chincha (27-k), Tantará (27-l) y Castrovirreyña (27-m). INGEMMET, Boletín, Serie A: Carta Geológica Nacional, 44. 105 p
- Santacana, N. (2001): Análisis de susceptibilidad del terreno a la formación de deslizamientos superficiales y grandes deslizamientos mediante el uso de sistemas de información geográfico. Aplicación a la cuenca alta del rio Llobregat. Tesis Doctoral Universidad Politécnica de Cataluña
- Silgado, E. (1978): Historia de los sismos más notables ocurridos en el Peru entre 1513 y 1974. Instituto Geológico Minero del Perú, Lima, Perú, 120 pag.
- Tavera, H., Bufoan, E. (2001): Source mechanism of earthquakes in Peru. *Journal of Seismology* 5: 519–539, 2001.

- Tavera, H., Bernal, I., Gomez, J-C. (2010): Zonificación Sísmico-Geotécnico para el Distrito del Callao (Comportamiento Dinámico del Suelo). Informe Técnico COOPI-IRD.
- Tavera, H., Bernal, I., Gomez, J-C. (2010): Zonificación Sísmico-Geotécnico para el Distrito del Lima (Comportamiento Dinámico del Suelo). Informe Técnico COOPI-IRD.
- Tavera, H., Bernal, I., Condori, C. (2012): Propuesta del mapa de Peligro Sísmico para el Perú. Sismología, IGP.
- Tavera et al, (2002): The Arequipa (Peru) earthquake of June 23, 2001. *Journal of Seismology*, 6: 279-283, 2002.
- Tavera, H. (2014). Mapa Sísmico del Perú, periodo 1960 – 2014. Dirección de Ciencias de la Tierra Sólida, IGP.
- Tavera et al, (2014). Estimación del Peligro Sísmico para el Perú. Subdirección de Ciencias de la Tierra Sólida, IGP.
- Varnes D.J. (1958). "Landslides types and processes". Special report 29: Landslides and engineering practice (E.B. Eckel, ed.) HRB, National Research Council, Washington, D.C., pp. 20-47.
- Varnes D.J. (1978). "Slope movement types and processes". Special report 176: Landslides: Analysis and control (R.L. Schuster and R.J. Krizek, eds.), TRB, National Research Council, Washington, D.C., pp.11-33.
- Villota, H., (1991) - Geomorfología de las zonas montañosas, colinados y ondulados. Instituto Geográfico Agustín Codasi (IGAC), Santafé de Bogotá. D.C. Colombia. 212 p.
- Young, R., S. Chiou, W. Silva, J. Humphrey (1997): Strong Ground Motion Attenuation Relationship for subduction zone earthquakes. *Seism. Res. Lett.*, V-68, N-1, January/February.

MAPAS



Centro Nacional de Monitoreo Sísmico - Acelerométrico

DIRECCIÓN DE CIENCIAS DE LA TIERRA SOLIDA

Calle Calatrava 216 – Urb. Camino Real – La Molina

Teléfono: 3172300 (140)